

توصیف الگوهای ژئوشیمیایی با استفاده از روش‌های تحلیل مؤلفه اصلی و کلاستر فازی میان‌مرکز (FCMC) برای ثبت بی‌هنجاری‌های ضعیف (منطقه قولان - آذربایجان شرقی)

محمدجعفر محمدزاده^۱، حمید شهین فر^۲ و آینور ناصری^۳

^۱دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

^۲گروه زمین شناسی، دانشگاه آزاداسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران.

^۳گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاداسلامی واحد اهر، اهر، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۶/۰۱

چکیده

ثبت بی‌هنجاری‌های بهینه ژئوشیمیایی نیازمند پی‌جویی‌های توجیهی (Orientation Survey) است که یکی از لایه‌های مهم آن انتخاب روش بهینه تحلیل داده‌هاست. شناسایی مناطق کانی‌زایی شده و پنهان با استفاده از روش‌های نوین و ارائه الگوی مناسب عناصر ردیاب برای بررسی پتانسیل‌های امیدوارکننده با مؤثرترین روش در منطقه قولان، هدف این پژوهش و گامی در جهت بهینه‌سازی عملیات اکتشافی است. در این راستا، ۲۳۳ نمونه از رسوبات آبراه‌های برداشت و برای عناصر پایه و ردیاب‌های مربوط به آنها (Cu, Mo, Cr, Co, Ni, Pb, Zn, As, Y...) تجزیه شدند. فرایند پردازش داده‌ها با استفاده از دو روش تحلیل مؤلفه اصلی و خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز (Fuzzy C-means Clustering) (FCMC) انجام و بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه شناسایی شدند. نتایج حاصل از به کارگیری روش خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز (FCMC) بر روی داده‌های منطقه نشان‌دهنده ثبت بی‌هنجاری‌های Cu و Mo در محدوده قره چیلر بوده به گونه‌ای که تفکیک بی‌هنجاری‌های این دو عنصر از یکدیگر، احتمالاً به دلیل اسیدی شدن منطقه و شستشوی رخنمون‌های سولفیدی و حمل و نقل Mo به صورت مولیبدات‌ها صورت گرفته و باعث جدایش تقریبی هاله‌های ثانویه Cu از Mo در نزدیکی یکدیگر شده است. اعمال FCMC بر اساس منطق فازی (Fuzzy Logic) حاکی از قرارگیری Cu و Mo در یک خوشه و همپوشانی بی‌هنجاری‌های آن نشان‌دهنده پارازیت این دو عنصر است. مقایسه نتایج حاصل از دو روش، بیانگر ثبت بی‌هنجاری‌های مشابه در منطقه با به کارگیری هر دو روش خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز (FCMC) و PCA است اما الگوی ثبت بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی توسط PCA نشان می‌دهد که اعمال این روش در شدت بخشی به هاله‌های ژئوشیمیایی ضعیف و بی‌هنجاری‌های پنهان، مؤثرتر از خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز (FCMC) عمل می‌کند. به گونه‌ای که با این روش بجز محدوده قره چیلر، باختر لوتکه و بی‌هنجاری‌های پنهان نمینق نیز با الگوهای ژئوشیمیایی مناسب Cu-Mo در امتداد همان پهنه (شمال باختر - جنوب خاور) با شدت قوی‌تری ثبت شدند. بررسی‌های بعدی نشان می‌دهد که روش PCA در حذف اثر ترکیب سنگی و ثبت الگوهای بهینه ژئوشیمیایی مؤثرتر است و نتایج حاصل از آن در منطقه صحت بیشتری دارد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی ژئوشیمیایی، تحلیل مؤلفه اصلی، خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز، منطقه قولان.

*نویسنده مسئول: محمدجعفر محمدزاده

E-mail: mohammadzadeh@sut.ac.ir

۱- مقدمه

ثبت بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی و جدایش آن از زمینه، از اساسی‌ترین مسائل در مطالعات اکتشافی است که باید در آن تمام عوامل ایجادکننده بی‌هنجاری مدنظر قرار گیرند بویژه این که همه بی‌هنجاری‌ها در ارتباط با کانی‌سازی نیستند. بنابراین، شناخت الگوی پراکندگی عناصر در محیط‌های مختلف در راستای شدت بخشیدن به هاله و ثبت بی‌هنجاری‌های ضعیف، اهمیت بسزایی دارد. بنابراین، ضرورت وجود روش‌هایی برای بهینه‌سازی فرایندهای ژئوشیمیایی و ثبت بی‌هنجاری‌های واقعی اهمیت دارد (Fresman, 1939) و فتحی، (۱۳۸۲). یکی از روش‌هایی که کاربرد فراوانی در مطالعات اکتشافی و بررسی الگوی ژئوشیمیایی عناصر دارد، روش آماری چند متغیره است. این روش به بررسی تغییرات همزمان چند متغیر و استنباط آماری ناشی از آن می‌پردازد و به دلیل دارا بودن خطای کمتر و اعتبار بیشتر نسبت به روش‌های آماری تک متغیره یا دو متغیره کاربرد فراوانی در مطالعات علوم زمین دارد (Howarth & Sinding-Larson, 1983) به گونه‌ای که می‌تواند برای ثبت بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی (Loska & Wiechula, 2003)؛ در مطالعات دورسنجی (Du & Flower, 2008; Crosta & Rabelo, 1993; Loughlin, 1991) در مطالعات زیست‌محیطی (Loska & Wiechula, 2003)؛ در مطالعات نفت و گاز (Prinzhofer et al., 2000; Pasadakis et al., 2004) و در مطالعات ژئوفیزیکی (Sabati et al., 2007) و ... به کار رود. تحلیل مؤلفه اصلی (Principal Components Analysis (PCA) از روش‌های آماری چند متغیره مبتنی بر مقادیر ویژه است که در آن با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه، جهت‌هایی با بیشترین تغییرپذیری

منطقه مورد مطالعه قولان واقع در ۵۰ کیلومتری شمال تبریز و ۷۰ کیلومتری باختر شهرستان اهر با مختصات جغرافیایی ۴۶° ۱۵' تا ۴۶° ۳۰' طول خاوری و ۳۸° ۴۵' تا ۳۹° عرض شمالی است. با توجه به شباهت‌های ترکیب سنگی منطقه ارسباران - قره‌داغ (شمال باختر ایران - آذربایجان شرقی) و ادامه آن در دو سوی شمال و جنوب رودخانه ارس در جمهوری آذربایجان و ارمنستان که به صورت یک توده باتولیتی اردوباد - میگری - قره داغ تجلی می‌یابد، نیاز به مطالعات دقیق‌تر و ارائه الگوهای بهینه در شناسایی پتانسیل‌های بالقوه این منطقه به همراه پتانسیل‌های پنهان، ضروری به نظر می‌رسد. بخش شمالی این باتولیت توسط زمین‌شناسان شوروی سابق مطالعه شد که نتیجه آن، اندیس‌های بسیاری در شمال رودخانه ارس است که برای مثال کانسار Cu-Mo میگری ارمنستان در فاصله ۳ کیلومتری مرز ایران (روبروی پاسگاه نودوز) در ارتباط ژئوتیکتی با این باتولیت، استخراج و محصولات تغلیظ شده آن به کشورمان صادر می‌شود.

کارهای اکتشافی انجام یافته پیشین در منطقه (رستم اف، ۱۳۷۱؛ قبری، ۱۳۸۱؛ علوی، ۱۳۷۱؛ مؤمن زاده، ۱۳۶۴ و ملاک پور، ۱۳۵۲) بیشتر بر اساس مطالعه داده‌های خام و روش‌های سنتی انجام یافته و در برخی از موارد مناطق مستعد پنهان، نامستعد پذیرفته شده‌اند. بنابراین، اکتشافات ژئوشیمیایی نیمه تفصیلی با هدف تعیین پتانسیل کانی‌زایی در منطقه، با برداشت نمونه‌های رسوبات آبراه‌ای که حاصل تخریب فیزیکی شیمیایی سنگ‌های موجود، کانی‌سازی، مناطق دگرسانی و احتمالاً آلودگی بود، انجام شد.

رسوبی سبب تشکیل رخساره‌های متنوع آذرآواری و تبدیل جانی رخساره‌ها به یکدیگر شده است که رخنمون آنها در جنوب نقشه زمین‌شناسی قابل مشاهده است. فعالیت‌های ماگمایی دوران الیگوسن هم نقش زیادی در زمین‌شناسی منطقه ایفا کرده است. به‌گونه‌ای که فعالیت‌های زمین‌ساختی آلپین میانی که مترادف با پیدایش توده‌های آذرین نفوذی گرانیت، گرانودیوریت، سنیت و دیوریت بوده‌اند، توانسته‌اند با تأثیر در نهشته‌های رسوبی و آذرین به شکل گسل و چین‌خوردگی ظاهر شوند. روند گسل‌های اصلی منطقه منطبق بر روند محوری طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌های منطقه و گسترش اصلی آنها با توجه به نقشه زمین‌شناسی به‌صورت شمال‌باختر-جنوب‌خاور و خاوری-باختری است (علوی، ۱۳۷۱). سری آتشفشانی پالئوژن که به‌عنوان فرایندی از چرخه تکنوئوماگمایی آلپین شناخته شده، توانسته است در شمال باختر ایران و در محدوده شهرستان اهر میزان کانی‌سازی‌های مهمی از عناصر Cu و Mo و فلزات گرانبها مانند طلا و نقره باشد. به‌نظر می‌رسد که این کانی‌سازی‌ها منطبق بر کمربند مس آلپ-همیالیا و گسل‌زایی منطقه از شمال‌باختر به جنوب‌خاور به سوی کانسار مس سونگون کشیده شود (رستم اف، ۱۳۷۱).

از مهم‌ترین توده‌های نفوذی این بخش می‌توان به توده‌های نفوذی قولان، دوزال و آستامال اشاره کرد که به‌صورت گنبدی شکل بلندی‌های شمال منطقه را با ترکیب اصلی گرانیتوئیدی تشکیل می‌دهند. تکوین توده باتولیتی در حقیقت منطبق با فاز ماگماتیسیم گرانیتوئیدی، گام میانی تکوین ساختاری بزرگ ناودیس قفقاز کوچک به‌حساب می‌آید که محدوده گسترده‌ای را از آستامال تا اشتوبین از جنوب خاوری تا شمال خاوری، رودخانه ارس در شمال و دره نوجه‌مهر در باختر و جنوب باختر می‌سازد. این توده ماگمایی به‌شدت تحت تأثیر دگرسانی گرمایی قرار گرفته که منجر به تشکیل پتانسیل‌های معدنی شناخته شده در سامانه آتشفشانی-نفوذی شیور داغ-شاه‌جهان-اردوباد شده است. کانی‌سازی چندفلزی مولیبدن، مس، سرب و روی، مهم‌ترین منابع شناخته شده در این سامانه فلززایی است. به‌طور کلی منطقه کانی‌سازی شده از روستای دوزال و باختر آن یعنی کوه چمتال شروع و تا جنوب خاوری منطقه ادامه می‌یابد. سنگ‌های دگرسان شده بیشتر از گرانودیوریت تشکیل شده‌اند که دگرسانی‌هایی از نوع سریسیتیزاسیون، اپیدوتیزاسیون، کلریتیزاسیون، آرژیلیتیزاسیون، پیریتیزاسیون، آلونیتیزاسیون و لیمونیتیزاسیون در یک دگرسانی گرمایی تظاهر نشان می‌دهند (شرکت مشاورین چکان، ۱۳۷۷). کانی‌سازی چیره در ناحیه، مربوط به آهن و مس است. مس به‌صورت کانی‌های سولفور و کربناتی و آهن بیشتر به‌صورت ترکیب سولفوری (پیریت) در بخش گسترده‌ای از شمال ناحیه دیده می‌شوند.

منطقه قره چیلر و معدن متروکه آن پس از جنگ جهانی دوم توسط روس‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفته و در سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۷۰ مطالعات گسترده‌ای توسط برنا و جان نثاری (۱۳۷۲) در چارچوب طرح سراسری اکتشاف طلا در منطقه انجام شده است. وی میزان ذخیره طلای نهشته قره چیلر تا ژرفای ۱۰۰ متر را امیدوارکننده و حدود ۱/۸ تن با عیار ۰/۵ گرم در تن اعلام می‌دارد که ۶۰۰ کیلوگرم از آن مربوط به رگه‌های سیلیسی طلا دار و بیشترین طلا در نمونه‌های برداشت شده در گزارش، ۲۲ ppm اعلام شده است. بر اساس همان گزارش، ژنز کانسار، اپی‌ترمال گزارش شده که با مشاهدات صحرائی نویسندگان این مقاله و شواهد عینی همخوانی دارد. شواهدی همچون حضور مولیبدن و پراکندگی دانه‌بندی ریز کالکوپریت در ماتریس سنگ میزبان، بافت پورفیری سنگ دربرگیرنده، از شواهد پورفیری بودن نهشته قره چیلر است. در مورد رگه‌های نزدیک به سطح زمین باید بیان کرد که باز هم از ویژگی‌های کانسارهای پورفیری است که در سطح به‌صورت رگه‌ای تظاهر می‌یابند و هر چه به ژرفا و پیرامون کانسار رجوع شود ویژگی‌های پورفیری بودن بیشتر هویدا می‌شود (Woodal, 1984; Webb, 1958).

شناسایی می‌شود و سپس با تعریف متغیرهای جدیدی (مؤلفه اصلی) که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند، تعداد ابعاد متغیرهای اولیه کاهش می‌یابد و نقش هر یک از این متغیرها در تغییرپذیری مشخص می‌شود. به‌عبارت دیگر این روش، روشی است برای یافتن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته که تشکیل یک دستگاه محور مختصات جدید را بدهند و هدف از آن توجه بخش بزرگی از تغییرپذیری بین مشاهدات که به‌صورت n نقطه در فضای P بعدی ظاهر می‌شوند در فضایی با بعد کمتر است.

روش خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز از روش‌های مهم نوین در خنثی‌سازی اثر مؤلفه سزنتیک و بهینه‌سازی در اکتشافات ژئوشیمیایی است که بر پایه منطق فازی استوار و در آن بحث تابع عضویت و تعلق یک نمونه به چند خوشه مطرح است به‌گونه‌ای که در تعریف هر مجموعه افزون بر بیان اعضا، باید مقدار درجه عضویت اعضا نسبت به مجموعه نیز بیان شود. در این منطق، هر متغیر می‌تواند با درجه عضویت مختلف در چندین مجموعه عضویت داشته باشد. مقایسه این روش با روش‌های خوشه‌بندی محدود (Hard Clustering) نشان می‌دهد که در روش خوشه‌بندی محدود، هر نمونه فقط می‌تواند به یک خوشه تعلق داشته باشد. بنابراین با توجه به چنین محدودیتی، گاه نتایج قابل قبولی به‌دست نمی‌آید. برای مثال نمونه‌های مرزی، نمونه‌هایی که میزان تعلق آنها به چند خوشه یکسان است و یا مقادیر خارج از رده (Outlier)، در اعمال این روش‌ها مشکل‌ساز هستند. اما در روش‌های فازی با توجه به این اصل که هر نمونه می‌تواند به چندین خوشه تعلق داشته باشد می‌توان محدودیت‌ها و مشکلات ایجاد شده را حل کرد (Kramar, 1995; Rantitsch, 2000). با استفاده از این روش اقدام به حذف اثر سزنتیک کرد. در پژوهش‌های انجام یافته توسط این پژوهشگر، بیشتر سعی بر انطباق خوشه‌های به‌دست آمده از این روش با جوامع سنگی منطقه شده است به‌گونه‌ای که تا حد امکان، هر خوشه نماینده یک و گاهی دو جامعه باشد. بنابراین، در این پژوهش، کاربرد روش تحلیل مؤلفه اصلی و خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز با هدف ثبت بی‌هنجاری‌های بهینه ژئوشیمیایی منطقه و شناسایی مناطق امیدبخش و جدایش مناطق کانی‌زایی و سپس تفسیر عامل‌های کنترل‌کننده کانی‌زایی احتمالی در منطقه قولان بر اساس نتایج حاصل از دو روش بالا و روابط همبندی (پاراژنتیکی) عناصر بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

پیشینه اکتشافات ژئوشیمیایی در منطقه قولان برای عناصر Cu و Mo با استفاده از روش‌های سنتی و آمار تک متغیره و دو متغیره نشان‌دهنده ثبت محدوده قره چیلر به‌عنوان منطقه امیدبخش کانی‌زایی است (قنبری، ۱۳۸۱). بنابراین، هدف از این بررسی، تعیین مناطق امیدبخش کانی‌زایی در منطقه با به‌کارگیری روش‌های نوین اکتشافی همانند روش تحلیل مؤلفه اصلی و خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز است تا با توجه به ماهیت این روش‌ها که ساختار و موقعیت فضایی نمونه را مد نظر قرار می‌دهند، ثبت هاله‌های گسترده‌تر و شدت‌بخشی به بی‌هنجاری‌های ضعیف و پنهان ژئوشیمیایی و بهینه‌سازی داده‌ها، انجام شده و مناطق امیدوارکننده دیگری ثبت شوند و بدین‌سان احتمال کشف ذخایر افزایش و ریسک عملیات اکتشافی به مراتب کاهش یابد.

۲-۱. زمین‌شناسی و فلززایی منطقه قولان

کهن‌ترین واحد سنگی، مجموعه دگرگونه‌ای است که پروژند اصلی این رخساره در شمال خاور منطقه نمایان بوده و از لایه‌های متناوب اسلیت، میکاشیست، متانوف، متاآندزیت، کالک‌شیست و کوارتزیت تشکیل شده است. این سنگ‌ها در اثر نفوذ توده‌های آذرین، یک دگرگونی دوباره را تحمل کرده‌اند (نقشه زمین‌شناسی ورقه سیه رود شکل ۱). در دوران کرتاسه بالایی جنب‌وجوش و فعالیت حوضه‌های

۲-۲. نمونه برداری

انتخاب محیط نمونه و بخش مناسب رسوبات آبراهه‌ای به منظور تجزیه، برای دست‌یابی به بهترین کنتراست، یک امر حیاتی است. هدف، افزایش کنتراست و کاهش تغییرات طبیعی در درون جوامع داده زمینه و بی‌هنجاری با هزینه کم و سطح اعتماد خوب است. به هر حال، نمونه‌های ویژه‌ای که برای شدت بخشیدن به بی‌هنجاری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌طور عموم نسبت به نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای تغییرات طبیعی بیشتری دارند. اگر چه، در یک محیط نمونه ویژه، مقادیر بی‌هنجاری‌ها ممکن است به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا کند، اما به‌طور معمول حد زمینه نیز افزایش می‌یابد (Rose et al., 1979; Lovering et al., 1950).

محدوده نمونه‌برداری برگه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ قولان (یکی از چهار برگه توپوگرافی مربوط به برگه سیه رود) را شامل می‌شود که عملیات نمونه‌برداری با یک مطالعه توجیهی اولیه (Orientation Survey) از رسوبات آبراهه‌ای ۱- خشک و ۲- کانال‌های فعال انجام گرفت. تا حد امکان نمونه‌ها در این مرحله نزدیک‌تر از حد معمول برداشت و بر اساس نتایج حاصل و بررسی وضعیت منطقه، تراکم نمونه‌برداری در این مطالعه ۸۰۰ متر انتخاب شد. در این عملیات اکتشافی، ۲۳۳ نمونه رسوب آبراهه‌ای، بویژه اجزای سیلیسی و رسی برداشت و تا حد مش کمتر از ۲۰۰- برای تجزیه عناصر Zn، Ni، As، Pb، Cu، Mo، Co، Y جهت ثبت هاله‌های ثانویه آماده‌سازی شد. در همین راستا، از Tributary Streams به‌دقت نمونه‌برداری شد. نمونه‌های رسوبات از رودها و کانال‌های فعال که کاملاً از دهانه اصلی دور بودند، برداشت شدند تا از رقیق شدن نمونه‌ها به‌دلیل سقوط برخی از Colluvium‌های محلی در نمونه‌های اصلی پرهیز شود.

شکل ۲ نقاط مربوط به نمونه‌برداری در منطقه قولان را نشان می‌دهد که نتایج تجزیه به آنها اساس مطالعات این پژوهش است.

۲-۳. پردازش داده‌ها

– روش PCA: همان‌گونه که بیان شد، روش PCA روشی است برای پیدا کردن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته که یک دستگاه محور جدید را تشکیل بدهند؛ این محورهای جدید در امتداد بیشترین واریانس داده‌ها رسم می‌شوند. مؤلفه‌ای که به‌طور معمول درصد بیشتر تغییرپذیری را شامل می‌شود به‌عنوان مؤلفه اصلی اول (PC_1) در نظر گرفته می‌شود. مؤلفه بعدی (PC_2) که عمود بر آن است نسبت به PC_1 درصد تغییرپذیری کمتری دارد. مؤلفه‌های سوم، چهارم و ... مقادیر یکنواخت واریانس کاهش یافته در دستگاه داده‌ها را شامل می‌شوند. با فرض این که اولین مؤلفه اصلی (PC_1) به‌صورت ترکیب خطی از متغیرهای اولیه x_1 تا x_p باشد، می‌توان نوشت:

$$y_1 = PC_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \quad (1)$$

و به شکل ماتریسی می‌توان نوشت:

$$y_1 = [a_1]^T [x] \quad (2)$$

اگر در ترکیب خطی بالا، ضرایب a_{ij} (وزن‌ها) بزرگ باشند، واریانس را به‌طور قابل توجهی افزایش خواهد داد. بنابراین برای این ضرایب به‌صورت زیر محدودیت در نظر گرفته می‌شود:

$$a_{11}^2 + a_{12}^2 + \dots + a_{1j}^2 = 1 \quad (3)$$

و واریانس آن به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$Sy_1^2 = [a_1]^T [s][a] \quad (4)$$

که در آن $[S]$ ، ماتریس کواریانس متغیرهای اصلی و a_{ij} ضرایب متغیرهای اولیه هستند. به‌طور خلاصه هر مؤلفه اصلی را می‌توان به‌صورت یک بردار $[Y]$ ، کل متغیرهای اولیه را به‌صورت یک بردار $[X]$ و بالاخره وزن‌های مربوط به آنها را به‌صورت یک ماتریس $[A]$ نشان داد که در آن، $[A]$ ماتریسی است که هر سطر آن، بارهای مربوط به هر یک از مؤلفه‌های اصلی است؛ رابطه آنها را به‌صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$[y] = [A][x] \quad (5)$$

تعداد مؤلفه‌های اصلی قابل محاسبه، بستگی به تعداد متغیرهای اولیه همبسته و بیشترین درصد واریانس قابل توجیه دارد. معمولاً اولین چندمؤلفه اصلی می‌توانند بخش بزرگی از تغییرپذیری را توجیه کنند. بنابراین، در عمل می‌توان به قیمت از دست دادن توجیه چند درصد از تغییرپذیری، تعداد مؤلفه‌های اصلی را نسبت به متغیرهای اولیه تا حد بسیار زیادی کاهش داد (حسینی پاک، ۱۳۸۰).

– روش خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز (FCMC): روش خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز (FCMC) روشی است که بر اساس منطق فازی شکل گرفته و در آن بحث تابع عضویت و تعلق یک نمونه به چند خوشه مطرح است. از مهم‌ترین فرضیاتی که در این روش وجود دارد این است که مجموع درجه عضویت هر نمونه در کل خوشه‌ها باید برابر یک باشد.

$$\sum_{i=1}^c \mu_i = 1 \quad (6)$$

که در آن c تعداد خوشه‌ها و μ_i درجه عضویت نمونه در خوشه i ام است.

با فرض برداشت n نمونه و اندازه‌گیری m عنصر برای آنها، برای تقسیم نمونه‌ها به c خوشه با مرکز معلوم باید الگوریتم زیر رعایت شود:

- ۱- ابتدا برای هر نمونه نسبت به هر خوشه یک درجه عضویت تصادفی انتخاب شود.
- ۲- با استفاده از درجه عضویت اولیه و مختصات مرکز خوشه‌ها، لازم است که مختصات مرکز جدید خوشه‌ها از این رابطه محاسبه شود:

$$c_{ij} = \sum (\mu_{ki})^q \cdot x_{kj} / \sum_{k=1}^n (\mu_{ki})^q \quad (7)$$

که در آن، c_{ij} مقدار متغیر i ام از مرکز خوشه j ام، μ_{ki} درجه عضویت نمونه k ام به خوشه i ام، x_{kj} مقدار متغیر j ام در نمونه k ام است. q معرف مقدار فاشدگی متغیر j ام در نمونه k ام است که ضریب فازی شدن (fuzziness coefficient) نامیده می‌شود. در مورد مقدار q هیچ تئوری مشخصی وجود ندارد اما برحسب اختیار مقداری میان ۱/۳ تا ۳ در نظر می‌گیرند که در اکتشافات ژئوشیمیایی بیشتر نزدیک ۱/۳ تا ۱/۵ است (حسینی پاک، ۱۳۸۰؛ Bezdek et al., 1984).

۳- پس از محاسبه مراکز جدید خوشه‌ها لازم است درجه عضویت هر نمونه به مرکز هر خوشه بر مبنای یکی از روش‌های اندازه‌گیری فاصله محاسبه شود در اینجا از فاصله اقلیدسی استفاده شده است.

$$\mu_{ik} = (d_{ik}^2)^{-1/q-1} / \sum_{k=1}^c (d_{ik}^2)^{-1/q-1} \quad (8)$$

که در آن، d_{ik} فاصله نمونه k ام از مرکز خوشه i ام است که در روش فاصله اقلیدسی به این صورت محاسبه می‌شود:

$$(d_{ik}^2) = \sum_{j=1}^k [(x_{kj} - c_{ij}) / s_j]^2 \quad (9)$$

۴- محاسبه تابع هدف: تابع هدف متغیر z در محیطی که ضریب فازی شدگی q باشد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$J_q = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (j_{ik})^q (d_{ik}^2)^q \quad (10)$$

۵- تکرار محاسبات تا زمانی که فاصله میان توابع هدف محاسبه شده در دو مرحله متوالی از یک مقدار بحرانی از پیش تعیین شده ϵ که میان 10^{-5} تا 10^{-3} است، کمتر باشد (Bezdek et al., 1984).

در این روش در همان ابتدا سه متغیر باید از پیش تعیین شوند که عبارتند از c (تعداد کلاس‌ها)، q (ضریب فازی‌شدگی) و ϵ (مقدار بحرانی). دو متغیر F (ضریب افراز یا جداسازی) و H (آنتروپی کلاس‌بندی) کمک می‌کنند تا مشخص شود که آیا مقادیر انتخابی درست بوده است و آیا مدل حاصل با محیط سازگاری دارد یا خیر. برای نیل به این هدف باید مقدار F به یک و مقدار H به صفر نزدیک باشد (Knox-Robinson, 2000; Brown, 2003).

۳- بحث

جدول ۱ نشان‌دهنده پارامترهای آماری داده‌های رسوبات آبراهه‌ای منطقه قولان است؛ نتایج حاصل از اعمال تحلیل مؤلفه اصلی روی داده‌های بالا در جدول ۲ و شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۳ (نمودار Scree plot) که مقادیر ویژه برحسب تعداد مؤلفه‌های اصلی رسم شده است، سه مؤلفه اول از هشت مؤلفه کل، بیشترین درصد تغییرپذیری ناحیه (۸٪) را توجیه می‌کنند. با توجه به جدول ۱ و شکل ۴ مشاهده می‌شود که مؤلفه اصلی اول (PC₁) مؤلفه‌های بسیار قوی است و بار فاکتوری آن برای همه متغیرها بجز Mo و Pb که تقریباً نزدیک به صفر است، تاحدودی مشابه است. همچنین در این مؤلفه، همبستگی بالای عناصر Cu، Co، Zn و Ni قابل مشاهده است. شکل ۴ که نقشه حاصل از بار فاکتوری مربوط به مؤلفه اصلی اول (PC₁) است، بیانگر توزیع تقریباً یکسان این عناصر در منطقه است. از نظر ژئوشیمیایی می‌توان گفت که این توزیع در اثر فرایند هوازدگی است که عناصر Ni، Zn، Co، Cu و Ni طی این فرایند، تحرک بالایی در محلول‌های آبی دارند و با پایداری به نسبت بالایی می‌توانند فاصله‌های طولانی را طی کنند. کاهش غلظت Pb در منطقه به تحرک Mo و گسترش هاله‌های ثانویه آن کمک کرده است. اما با توجه به PC₂ همبستگی بالا میان Mo و Pb قابل مشاهده است که احتمالاً به دلیل تشکیل کانی ثانویه و لفتیت بوده است. بنابراین از این مؤلفه در تفسیر ژئوشیمیایی عناصر و تعیین بی‌هنجاری Cu و Mo نمی‌توان استفاده کرد. مؤلفه اصلی سوم (PC₃) در جدول ۱ بیانگر همبستگی و بار فاکتوری بالای منفی میان Mo و Cu و همراهی و همبودی این دو عنصر است. شکل ۵ نقشه توزیع ژئوشیمیایی مربوط به PC₃ را نشان می‌دهد که نشان از معنی دار بودن همبستگی بالای Cu و Mo در دو محدوده نمینق و قره چیلر دارد. اما تمرکز Cu و Mo در نمینق به مراتب شدت بالاتری را نشان می‌دهد.

به طور کلی تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی منطقه قولان با استفاده از PCA نشان‌دهنده الگوی کانی‌زایی مس و عناصر همراه در راستای شمال باختر- جنوب خاور شامل لوتکه، قره چیلر و نمینق است که شدت کانی‌زایی در هر کدام از مناطق یادشده تابع عوامل طبیعی در منطقه است. این شدت، در نمینق بیشتر از دو منطقه دیگر، توسط این روش قابل ثبت است.

در راستای مقایسه روش‌ها، برای بهینه‌سازی داده‌های زیاد رسوبات آبراهه‌ای در منطقه و انتخاب روش مؤثر در فرایند آنها روش FCMC برای خوشه‌بندی مد نظر قرار گرفت. نظر به این که داده‌های غیرنرمال خوشه‌بندی را مختل می‌سازند و ویژگی‌های محیط را نشان نمی‌دهند، خوشه‌بندی بر روی داده‌های نرمال شده در منطقه انجام شد. همچنین در خوشه‌بندی داده‌ها لازم نیست تمام عناصر شرکت داده شوند و عناصر با داده‌های حساس بالا باید جایگزین شوند زیرا عملاً بیشتر داده‌های این نوع عناصر به دلیل بیشترین تعداد جایگزینی، صوری و بی‌تأثیر می‌شوند و به عبارت دیگر اگر عنصری درصد بیشتری داده حساس داشته باشد، حساسیت قابل قبولی ندارد و بی‌هنجاری‌های ثبت شده نمی‌توانند تصویر واقعی از این عنصر در فیلد نشان دهند.

برای به کارگیری روش FCMC و انتخاب تعداد خوشه‌های مناسب سه عامل مورد توجه قرار گرفت:

- ۱- مقادیر H و F بهینه، به گونه‌ای که F نزدیک به یک و H نزدیک به صفر شود.
- ۲- تعداد خوشه‌ها باید توجیه‌کننده محیط نمونه‌برداری باشد. اگر مقدار خوشه‌ها کم باشد، میانگین چند واحد سنگی به‌عنوان یک مرکز خوشه در نظر گرفته می‌شود که مطلوب نیست. در برابر آن، اگر تعداد خوشه‌ها زیاد باشد، هر مرکز خوشه به‌طور محلی محاسبه می‌شود و در نتیجه مقادیر بی‌هنجاری نیز در مراکز خوشه منعکس می‌شود که این امر موجب کاهش شدت بی‌هنجاری‌ها می‌شود.
- ۳- انتخاب تعداد خوشه‌ها باید به گونه‌ای باشد که در کل، مقادیر بازماند منفی کمتری را ایجاد کند.

در اکتشافات ناحیه‌ای رسوبات آبراهه‌ای با توجه به گسترده بودن منطقه نمونه‌برداری و تعداد زیاد نمونه‌ها، معمولاً ۴ تا ۸ خوشه تعداد بهینه‌ای است. با توجه به مقادیر H و F، گسترده بودن منطقه و این مطلب که در حالت ۵ خوشه‌های مقادیر بازماند منفی کمتری ایجاد می‌شود، حالت ۵ خوشه به‌عنوان حالت بهینه معرفی شد. پیرو محاسبه مرکز خوشه‌ها و درجه عضویت نمونه‌ها به هر خوشه، مقدار هر یک از متغیرهای ژئوشیمیایی در مرکز هر خوشه محاسبه شد که برابر با میانگین وزن‌دار همان متغیر در نمونه‌های موجود در آن خوشه است. پس از محاسبه مقدار متغیر در مرکز خوشه‌ها می‌توان مقدار متغیر در نقاط نمونه‌برداری شده با درجه عضویت معلوم نسبت به خوشه‌ها را محاسبه کرد.

با توجه به این که معمولاً مقدار عنصر محاسبه شده با مقدار اندازه‌گیری شده برابر نیست و همواره اختلافی وجود دارد، این اختلاف را که مقدار بازماند نامیده می‌شود از رابطه ۷ می‌توان محاسبه کرد:

$$\sigma_{kj} = X_{kj} - \sum_{i=1}^c \mu_{ik} C_{ij} \quad (11)$$

که در آن، X_{kj} مقدار عنصر k ام در نمونه k ، μ_{ik} درجه عضویت نمونه k ام در خوشه i ام و C_{ij} مقدار میانگین عنصر k ام در خوشه i ام است. در تفسیر مقادیر بازماند از دیدگاه ژئوشیمی می‌توان بیان کرد که مقادیر بازماند مثبت می‌تواند بیانگر وجود بی‌هنجاری در منطقه باشد که با رسم نقشه ژئوشیمیایی مربوط به آن، مناطق کانی‌زایی مشخص می‌شود. مقادیر بازماند منفی که ریشه در مقادیر کمتر از حد زمینه، ناهمگنی محیط نمونه‌برداری و خطاهای تجزیه و نمونه‌برداری دارند، احتمالاً ماهیت سنزنتیکی داشته باشند.

نقشه مقادیر بازماند حاصل از عملکرد روش FCMC در منطقه قولان برای عناصر Cu و Mo به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. برای انطباق نقشه‌های Cu و Mo در منطقه قره چیلر دو دلیل می‌توان بیان کرد. یکی این که شدت هاله و انطباق هر دو عنصر احتمالاً حاصل فعالیت‌های معدنی دیرین در منطقه است. دوم اینکه در ماهیت کاربرد روش PCA و FCMC تفاوت وجود دارد. که اولی جهت اصلی الگوی کانی‌زایی را بیشتر تأکید داشته و دومی خوشه مربوط به مهم‌ترین همبود کانی‌زایی مس در منطقه قولان را Mo معرفی می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- اعمال روش PCA در منطقه قولان موجب تأیید بی‌هنجاری‌های Cu-Mo در سه محدوده، در یک روند و راستای شمال‌باختر- جنوب‌خاور شد. استفاده از این روش نه تنها یک الگوی منظم را تأیید کرد، بلکه شدت کانی‌زایی منطقه نمینق را نسبت به قره چیلر و باختر لوتکه آشکار ساخت. بنابراین، با توجه به این پژوهش، محدوده نمینق به‌عنوان بی‌هنجاری بهینه Cu-Mo در منطقه قولان معرفی می‌شود.

- شدت کانی‌زایی Cu-Mo در منطقه مورد مطالعه قولان تحت تأثیر زمین‌ساخت قفقاز و سامانه آتشفشانی- نفوذی شیورداغ- شاه‌جهان- اردوباد، از شمال‌باختر به‌سوی جنوب‌خاور منطقه، با شدت بیشتری ادامه می‌یابد و ادامه این کانی‌زایی منطبق بر کمربند مس آلپ- هیمالیا به‌سوی مناطق سونگون، انجرد و کیقال کشیده شده است.

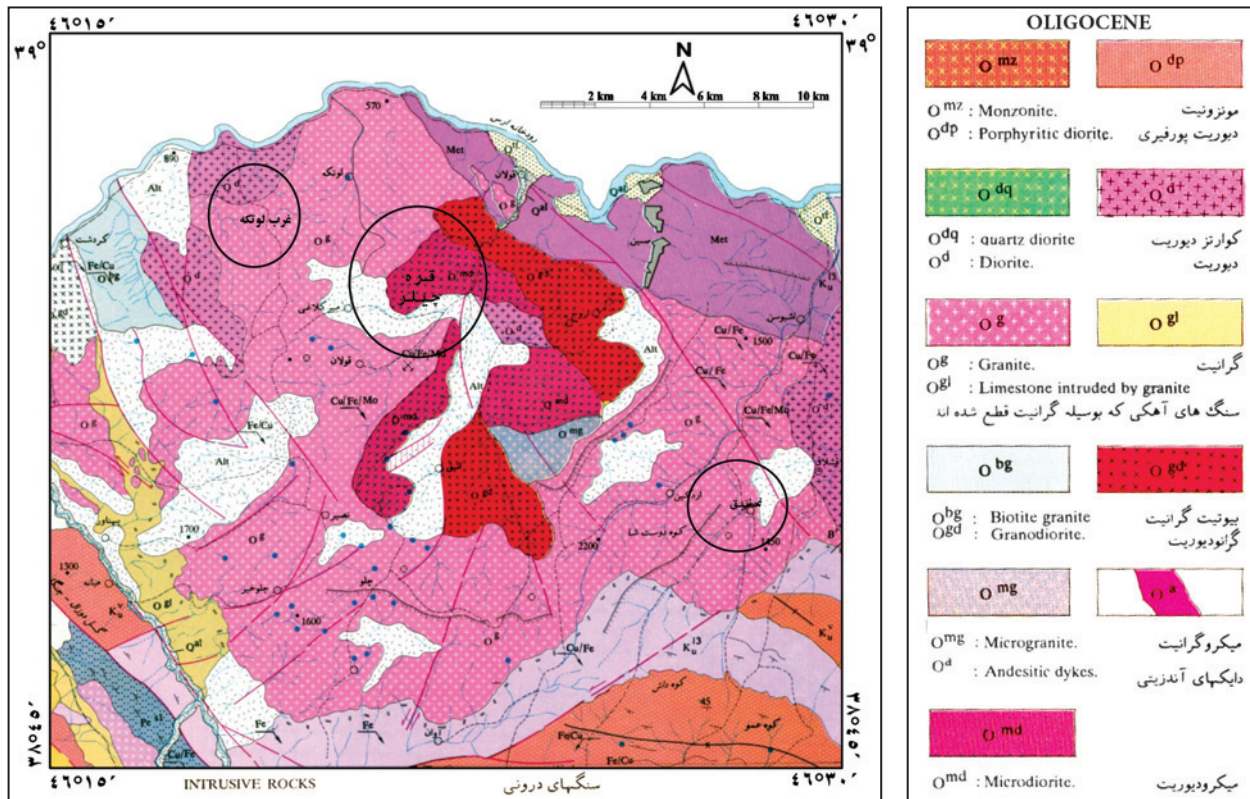
- به کارگیری روش خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز در منطقه قولان هدف اکتشافی امیدوارکننده‌ای را با هاله قوی از Cu منطبق بر قره چیلر نشان می‌دهد. این پژوهش نشان می‌دهد که همراهی و انطباق هر دو عنصر Cu و Mo در منطقه قره چیلر نتیجه به کارگیری روش FCMC است.

- مقایسه نتایج حاصل از اعمال روش‌های تحلیل مؤلفه اصلی و روش خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز در منطقه مورد مطالعه، بیانگر امیدبخش بودن محدوده باختر لوتکه- قره چیلر- نمینق برای پی‌جویی کانی‌زایی Cu-Mo می‌باشد و این مطلب، بیانگر مؤثر

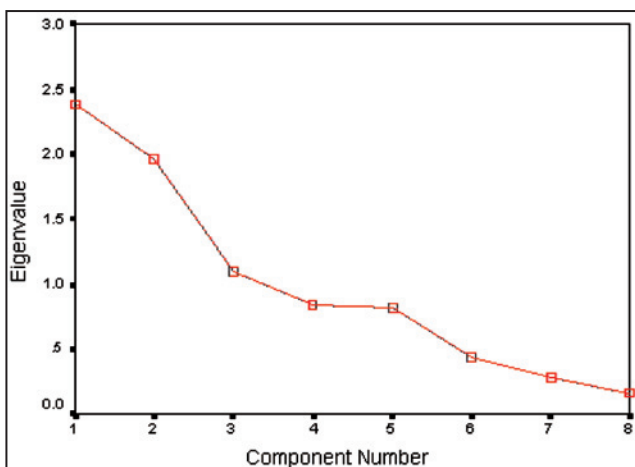
سیاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان مراتب سیاس خود را از زحمات آقایان یوسف قنبری و مرحوم مهندس نظمی آذر در هنگام نمونه برداری از منطقه و آقای سعید فقیه در تدارکات عملیات صحرایی اعلام می دارند.

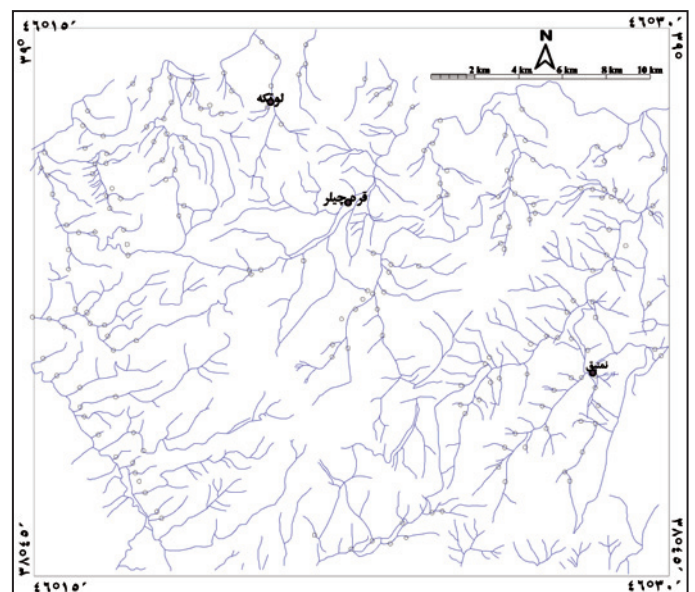
و موفق بودن کاربرد روش های بالا در ثبت بهتر بی هنجاری ها و بهینه سازی روش اکتشاف ژئوشیمیایی است. نظر به این که روش تحلیل مؤلفه های اصلی افزون بر حذف اثر ترکیب سنگی، تأثیر سنگ درونگیر رسوبات موجود در محل کانی سازی و ویژگی های فیزیکوشیمیایی محیط اطراف را نیز تا حد زیادی حذف می کند، نتایج حاصل از این روش در مقایسه با روش خوشه بندی فازی میان مرکز صحت بیشتری دارند.



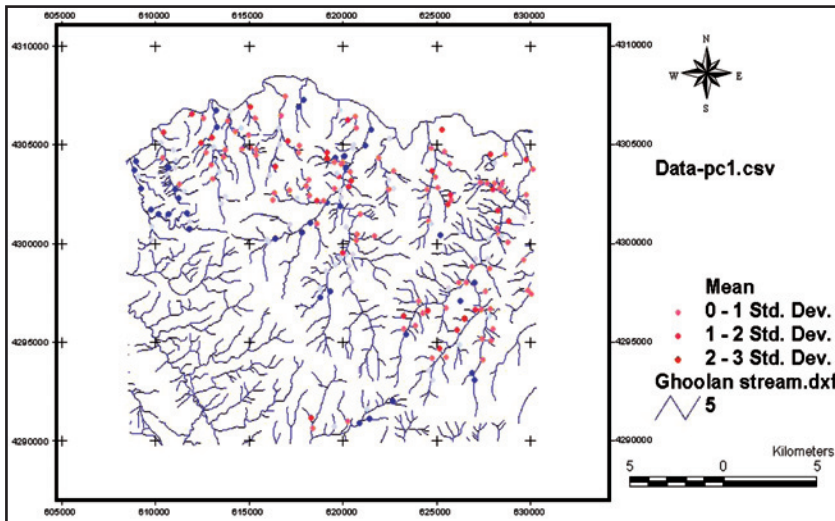
شکل ۱- موقعیت مناطق غرب لوتکه، قره چیلر و نمینق در نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سیاه رود.



شکل ۳- نمودار Screeplot حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی در منطقه قولان.

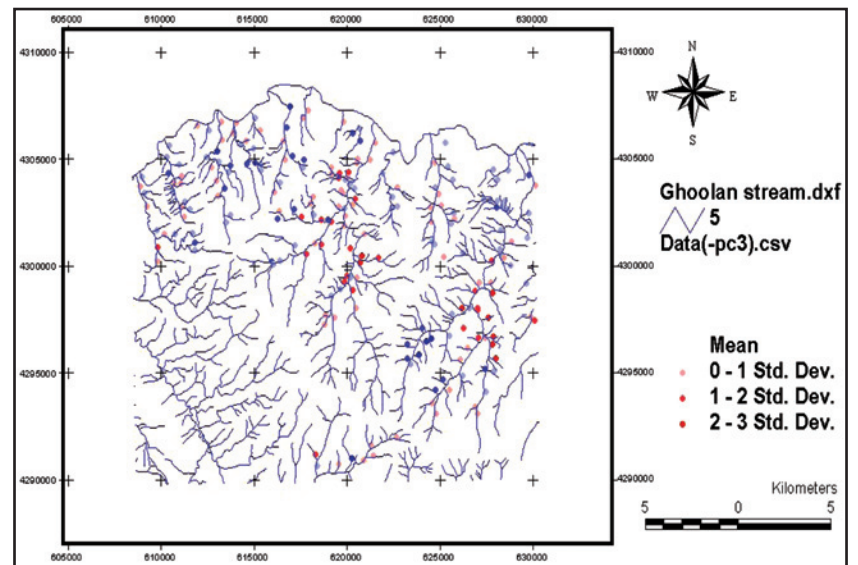


شکل ۲- نقاط مربوط به نمونه برداری رسوبات آبراهه ای در منطقه قولان.

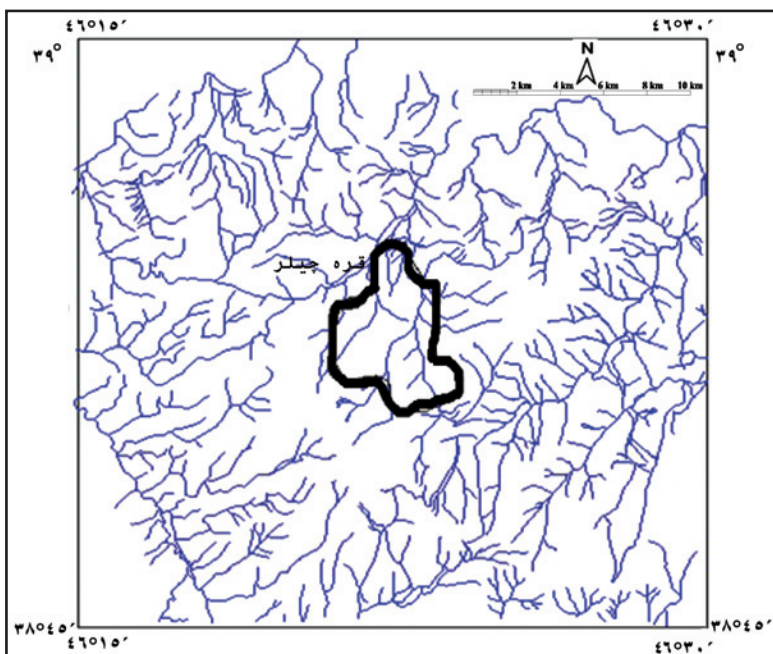


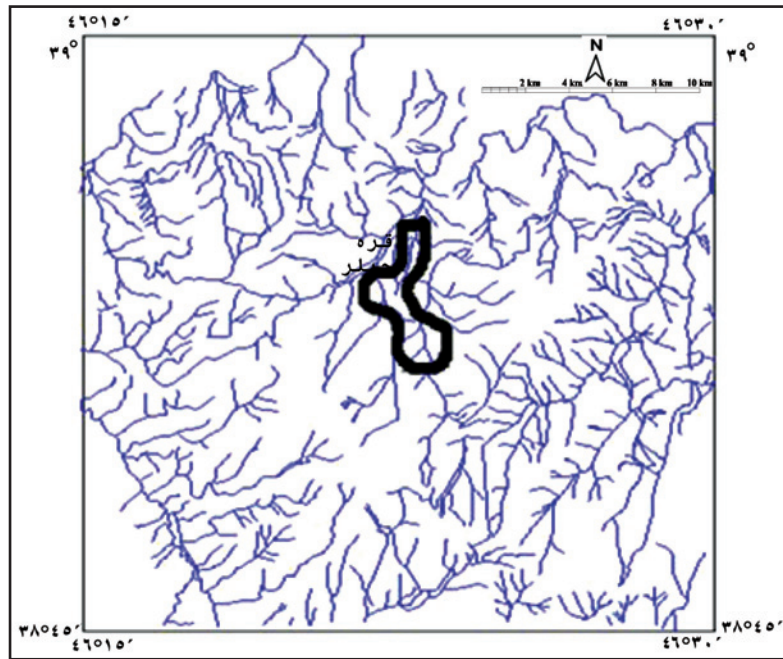
شکل ۴- نقشه حاصل از بار فاکتوری مربوط به مؤلفه اصلی اول (PC_1) (پراکنندگی نقاط سرخ رنگ).

شکل ۵- نقشه توزیع (PC_3) نشان دهنده همبستگی بالای Cu-Mo در محدوده نمینق و با شدت کمتر در محدوده قره چیلر.



شکل ۶- نقشه توزیع بی‌هنجاری‌های مس در منطقه قولان با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی میان مرکز.





شکل ۷- نقشه توزیع بی‌هنجاری‌های مولیبدن در منطقه قولان با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی میان‌مرکز.

جدول ۱- پارامترهای آماری داده‌های رسوبات آبراهه‌ای منطقه قولان.

	Co	Cu	Ni	Pb	Mo	Zn	Zr	U	Th	Y	As
N	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233
Mean	25.5322	131.876	22.1459	12.7983	26.4464	80.3219	199.764	0.9399	1.4592	17.4592	26.5536
Median	23	61	17	13	26	79	182	0	0	17	21
Mode	22	33	12	13	26	62	147	0	0	17	0
Std. Deviation	13.5038	614.363	18.0176	4.17067	4.6994	21.5315	116.159	1.6494	2.81763	2.33033	30.0271
Variance	182.353	377441	324.634	17.394	22.084	463.607	13492.9	2.721	7.939	5.43	901.627
Skewness	2.569	14.405	2.86	0.835	8.932	3.019	5.095	1.428	2.286	0.546	3.301
Kurtosis	14.105	214.926	11.446	4.154	101.33	26.692	33.559	0.748	5.52	0.946	13.072
Range	122	9271	135	33	61	247	1111	7	16	14	202
Minimum	5	14	3	0	23	26	69	0	0	12	0
Maximum	127	9285	138	33	84	273	1180	7	16	26	202
Sum	5949	30727	5160	2982	6162	18715	46545	219	340	4068	6187

جدول ۲- نتایج حاصل از اعمال تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی داده‌های رسوبات آبراهه‌ای در منطقه قولان.

عنصر	PC1	PC2	PC3
Cu	۰/۵۷۷	۰/۳۹۱	-۰/۴۸۶
Mo	-۰/۳۰۹	۰/۷۷۳	-۰/۳۴۱
Co	۰/۸۴۶	-۰/۳۲۸	۰/۱۴۳
Zn	۰/۸۱۷	-۰/۱۱	۰/۲۵۲
pb	-۰/۰۸۲	۰/۸۱۶	۰/۲۶۴
As	۰/۲۴۲	۰/۵۵۷	-۰/۰۱۵
Ni	۰/۶۳۲	۰/۳۳۵	-۰/۰۶۵
Zr	۰/۱۸۹	۰/۱۰۳	-۰/۸۴۷
تغییرپذیری تجمعی (%)	۳۸/۸۸	۶۸/۵	۸۸/۱۲

کتابنگاری

- برنا، ب.، جان نثاری، م. ر.، ۱۳۷۲- گزارش اکتشافی طلا در مناطق قره چیلر و قره دره و بررسی طلا در زونهای آرسنیک دار سیه رود و دستجرد. حسنی پاک، ع. ا.، ۱۳۸۰- تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۲۵۳۶.
- رستم اف، ز.، ۱۳۷۱- متالورژی در زون الحاق تکتونیکی ایران و قفقاز کوچک.
- شرکت مشاورین چکان، ۱۳۷۷- گزارش پتانسیل بابی منطقه شهرستان ارسباران، طرح بررسی ذخایر معدنی (آذربایجان شرقی).
- علوی، ح.، ۱۳۷۱- گزارش زمین شناسی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ سیه رود، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- فتحی، ه.، ۱۳۸۲- کاربرد هندسه فراکتال در جداسازی آنومالی و تخمین حدآستانه‌ای، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.
- قنبری، ی.، ۱۳۸۱- اکتشافات ژئوشیمیایی و بررسی پتانسیل‌های معدنی Cu-Mo و بکارگیری روشهای GIS در منطقه قولان (سیه رود، آذربایجان شرقی)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.
- ملاک پور، م. ع.، ۱۳۵۲- مطالعات مقدماتی حفاری وزمین شناسی ناحیه معدنی قره چیلر، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- مؤمن زاده، م.، ۱۳۶۴- گزارش ارزیابی ذخایر معدنی شناخته شده منطقه چهارگوش اهر، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Bezdek, J. C., Ehrlich, R. & Full, W., 1984 - FCM: the fuzzy c-means Clustering algorithm”, J. Computers & Geosciences (10), pp.191-20
- Brown, W., Groves, D. & Gedeon, T., 2003- Use of fuzzy membership input layers to combine subjective geological knowledge and empirical data in a neural network method for mineral-potential mapping: Natural Resources Research, International Association for Mathematical Geology, Special issue on Neural networks (12), pp.183-200
- Crosta, A. P, Rabelo, A., 1993- Assessing Landsat/TM for Hydrothermal mapping in Central Western, Brazil, in processing of the 9th Thematic Conference Of Geologic Remote Sensing.
- Du , Q. & Flower, E.J., 2008- Low-Complexity Principal Component Analysis for Hyperspectral Image Compression. International Journal of High Performance Computing Applications, pp. 438-448 .
- Fresman, A. E., 1939b- Geochemical and mineralgal methods of prospecting for useful minerals., In: U.S. Geol. surv. Circ.127, 37pp.
- Howarth, R. J. & Sinding-Larson, R., 1983- In: R. J. Howarth(editor), Statistic and Data Analysis in Geochemical prospecting. Handbook of exploration Geochemistry, vol.2, Elsevier, Amesterdam, pp: 207-289.
- Knox-Robinson, C. M., 2000- Vectorial fuzzy logic; a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralization potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia: Australian; Journal of Earth Sciences(47), pp. 929-941.
- Kramar, U., 1995- Application of limited fuzzy clusters to anomaly recognition in complex geological environments, Elsevier, Journal of Geochemical Exploration (55), pp. 81-92.
- Loska, K. & Wiechula, D., 2003- Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir, Journal of Chemosphere 51:723–733
- Loughlin, W. P. G., 1991- Principal Component Analysis Alteration Mapping. Photogram. Eng. Remote Sensing.
- Lovering, T. S., Huff, L. C., Almond, H., 1950- Dispersion of Copper from San Manual Copper Deposit., Pinal County, Arizona, Econ. Geol., 45:493-514.
- Pasadakis, N., Obermajer, M. & Osadetz, K. G., 2004- Definition and characterization of petroleum compositional families in Williston Basin, North America using principal component analysis. Journal of Organic Geochemistry 35 (2004) 453–468.
- Prinzhofer, A., Mello, M. R., Da Sila Freitas, L. C. & Takaki, T., 2000- A new geochemical characterization of natural gas and its use in oil and gas evaluation. In Mello M.R. and Katz, B.J.(Eds.), Petroleum systems and south Atlantic Margins.American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Memoir 70:107-119.
- Rantitsch, G., 2000- Application of fuzzy clusters to quantify lithological background concentrations in stream-sediment geochemistry; Elsevier, J. Geochem. Explor (71), pp. 73–82.
- Rose, A. W., Hawkes, H. E. & Webb, J. S., 1979- Geochemistry in mineral exploration.”, Academic press, New York .N.Y., 2nd ed., 657pp.
- Sabeti, H., Javaherian, A. & Araabi, N. D., 2007- Principal component analysis applied to seismic horizon interpretations .International congress of Petroleum Geostatistics , Cascais, Portugal, 10 - 14 September 2007.
- Webb, J. S., 1958b- Observation of Geochemical exploration in tropical terrains. In: Symposium de exploration Geochemica 20th. Int. Geol. Congr. Mexico City, 1956, pp: 143-147.
- Woodall, R., 1984- Success in mineral exploration Confidence in source and Ore deposit models.» Geosci. Can., 11:127-132.