



مقاله پژوهشی

شناسایی کانی زایی طلا در منطقه مینرالی قره چر با استفاده از روش تکینگی چند عنصری

پویا اسدی هارونی^{۱*}، امید اصغری^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: آذر ۱۴۰۲، پذیرش: اسفند ۱۴۰۲)

چکیده

تکینگی ویژگی انواع فرآیندهای طبیعی غیرخطی مانند فرآیندهای هیدروترمال در پوسته زمین است که باعث ایجاد ذخایر دارای غلظت‌های بالایی از فلزات می‌شود. نتیجه نهایی این فرآیندها بروز ویژگی‌های فرکتالی یا چند فرکتالی است که روش‌های متعددی برای شناسایی این ویژگی‌ها وجود دارد. روش نقشه توزیع تکینگی از جمله آنالیزهای چند فرکتال بوده که بر اساس شاخص تکینگی و به‌عنوان ابزاری برای جدایش آنومالی از زمینه یا جدایش آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای توسعه یافته است. در این پژوهش از روش نقشه توزیع تکینگی چند عنصری برای تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی، ویژگی‌های ساختاری و تعیین نحوه ارتباط بین عناصر در منطقه مینرالی قره چر واقع در ۴۲ کیلومتری جنوب باختر شهر سقز، استان کردستان، استفاده شده است. بانک داده شامل تعداد ۱۱۰۴ نمونه لیتوژئوشیمیایی با ۸ عنصر آنالیز شده شامل Au, As, Ag, Cu, Sn, Mo, Zn, Pb بود که ماهیت ترکیبی و همبستگی کاذب متعاقب داده‌ها در سیستم بسته باعث شد تا از تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی داده‌های تحت تبدیل لگاریتمی ایزومتریک استفاده شود. با توجه به نتایج حاصل از آن ارتباط بین عناصر Cu و As بر روی مؤلفه اصلی اول و مؤلفه اصلی دوم نشان‌دهنده عملکرد مستقل طلا در این منطقه است. استفاده از روش نقشه توزیع تکینگی بر روی این نتایج، مناطق امیدبخش و پرتانسیمی را برای عملیات اکتشافی معرفی کرده که با توجه به تطابق این مناطق با آلتراسیون‌های فیلیک، اکسیدهای آهن، کانه‌های سولفیدی و سلول‌های پر عیار طلا از اعتبار بالایی برای کانه‌زایی برخوردارند. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از نقشه‌های توزیع تکینگی می‌توان بیان نمود که این منطقه دارای دو تیپ متفاوت کانه زایی حرارت متوسط (مزوترمال) تا حرارت بالا در نیمه جنوبی و نوع حرارت پایین (آبی ترمال) تا مزوترمال در نیمه شمالی است؛ اما به توجه به حضور کانسارهای معروف طلای تیپ مزوترمال (کوهزایی) کرویان و قلقله واقع در نزدیکی منطقه قره چر، می‌توان عنوان نمود که احتمال حضور کانی سازی طلای تیپ کوهزایی بیشتر است، به‌طوری‌که می‌توان از معیارهای اکتشافی این تیپ کانسار برای اکتشافات بعدی در این منطقه استفاده نمود.

کلمات کلیدی

کانی‌زایی طلا، نقشه توزیع تکینگی، تبدیل لگاریتمی ایزومتریک، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، قره چر

*عهده‌دار مکاتبات: pooya.asadi@ut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2024.20963.1617

۱- مقدمه

مطالعات اخیر نشان داده که انواع مختلفی از فرآیندهای غیرمعمول زمین‌شناسی از جمله زلزله، آتش‌فشان‌ها، سیل، طوفان و کانی‌زایی منجر به آزاد شدن مقدار قابل‌توجهی انرژی یا تجمع جرم می‌شوند و معمولاً به فواصل زمانی یا مکانی کوتاه محدود هستند خصوصیت تجمع مقدار آنومال انرژی یا جرم را تکینگی می‌نامند و فرآیندی که منجر به چنین خصوصیتی می‌شود را فرآیند تکین می‌گویند [۲، ۱]. تکینگی یک ویژگی عمومی از فرآیندهای طبیعی غیرخطی است که اغلب نتایج نهایی فرکتالی یا چند فرکتالی را باعث می‌شود [۳-۸]. به‌عنوان مثال فرآیندهای هیدروترمالی در پوسته زمین می‌تواند منجر به تشکیل ذخایر معدنی با غلظت بالایی از فلزات با خواص فرکتالی یا چند فرکتالی شوند [۱۰، ۹].

برای شناسایی این ویژگی‌ها روش‌های متعددی توسعه داده شده است که به آنالیزهای فرکتال و چند فرکتالی معروف هستند. روش نقشه توزیع تکینگی از جمله این روش‌ها است که بر اساس شاخص تکینگی طراحی شده است. به‌کارگیری این روش به دلیل استفاده از یک پنجره متحرک و انطباق با شکل هندسی منطقه باعث می‌شود تا از تأثیرات لبه در نتایج حاصل از آن کاسته شود. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده از این روش استفاده هم‌زمان آن با یک روش چند متغیره علاوه بر تبیین آنومالی‌های چند عنصری، ارتباط بین عناصر را نیز بهتر مشخص می‌کند [۹، ۲-۱۳].

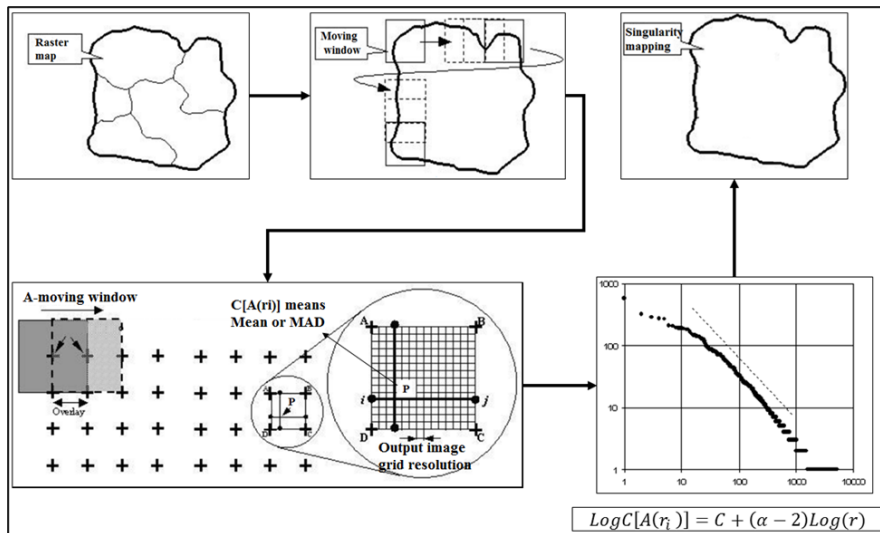
تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal component analysis) یکی از پرکاربردترین روش‌های آنالیز چند متغیره به‌منظور کاهش بعد و استخراج ویژگی است [۲، ۱۴-۱۸]. استفاده از این روش برای داده‌های عیارسنجی ژئوشیمیایی که دارای ماهیت ترکیبی هستند به دلیل وجود قید مجموع ثابت و همبستگی متعاقب داده‌ها مسائلی را به همراه خواهد داشت. محققان مختلفی از جمله پیرسن در سال ۱۸۹۷ [۱۹]، رولینسون در سال ۱۹۹۵ [۲۰] و آگازکیو در سال ۲۰۰۳ [۲۱] در مورد سیستم عددی با ماهیت ترکیبی کار

کرده‌اند. آگازکیو در سال ۲۰۰۳ [۲۱] روش تبدیل لگاریتمی ایزومتریک (Isometric Logratio Transformation) یا به‌اختصار ilr را پیشنهاد کرد که نتایج رضایت‌بخشی را نتیجه داد. تنها مسئله‌ای که در ارتباط با آن مطرح است، برگرداندن داده‌های تبدیل یافته به فضای اصلی توسط تبدیل لگاریتم ریشه‌ای مرکزی است که در مواقع لزوم تفسیر متغیرها به‌صورت گرافیکی باید انجام گیرد [۲۱].

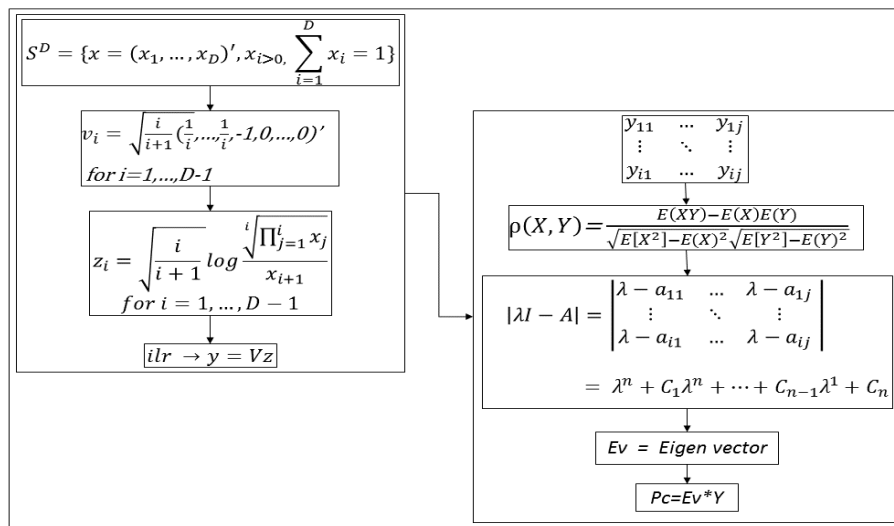
۲- موارد و روش‌ها

۲-۱- تکینگی

این روش بر اساس شاخص تکینگی و به‌عنوان ابزاری برای جدایش آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای و یا جدایش آنومالی از زمینه در ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی توسعه داده شد است. روش نقشه توزیع تکینگی رفتار ژئوشیمیایی عناصر را که نتیجه نهایی اثرات پیچیده فرآیندهای چندگانه زمین از جمله ماگماتیسم و فعالیت‌های تکتونیکی هستند را بررسی می‌کند. همچنین به‌کارگیری آن بروی نقشه‌های ژئوشیمیایی اطلاعات ارزشمندی برای شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی وابسته به کانی‌زایی را فراهم می‌کند [۱۲، ۲۲]. همچنان که قبلاً توضیح داده شد این روش از جمله آنالیزهای فرکتال و چند فرکتالی به‌منظور شناسایی ویژگی‌های تکینگی است که بر اساس یک پنجره متحرک طراحی شده و طبق فلوجارت ترسیم‌شده در شکل ۱ انجام می‌گردد. بدین نحو که ابتدا یک نقشه درون‌یابی شده از داده‌های ژئوشیمیایی تهیه و سپس با به‌کارگیری یک پنجره متحرک بر روی آن مقادیر میانگین غلظت محاسبه می‌شود. این روند تا زمانی که تمامی نقاط نقشه پوشش داده شود تکرار می‌گردد. در نهایت طبق رابطه ارائه شده در شکل ۲ مقادیر آلفا محاسبه و نقشه مربوطه ترسیم می‌شود. نهایتاً در صورتی که موقعیت‌های مشخص شده بر روی نقشه نهایی در تکینگی‌های کمتر از ۲ واقع باشد در گروه غنی‌شدگی‌ها و اگر با تکینگی‌های بیشتر از ۲ هماهنگی داشته باشد در گروه تهی‌شدگی‌ها دسته‌بندی می‌شود.



شکل ۱: فلوچارت روش ایجاد نقشه تکینگی با به‌کارگیری پنجره متحرک



شکل ۲: روابط تبدیل لگاریتمی ایزومتریک و تحلیل مؤلفه اصلی بکار گرفته‌شده در این مطالعه.

۲-۲- تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی روشی برای یافتن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته است که یک دستگاه محورهای جدید را تشکیل می‌دهند که این محورهای جدید در امتداد بیشترین واریانس داده‌ها ترسیم می‌شوند. در واقع هدف این روش دستیابی به دستگاه محورهای جدیدی است که بتواند با تعداد کمتر بعد میزان بیشتری از تغییرپذیری را توجیه کند [۲، ۱۸-۱۴].

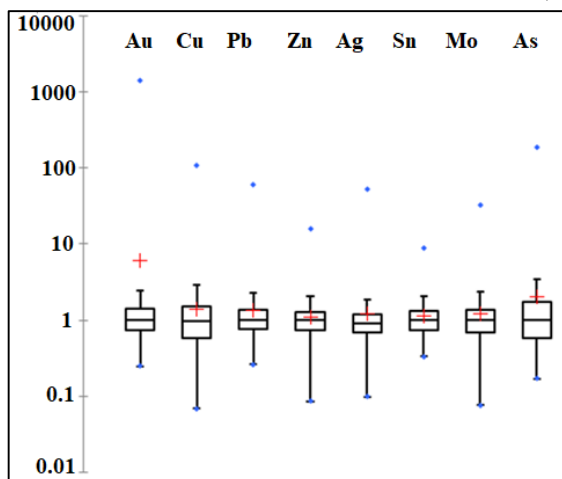
با توجه به اینکه این روش برای داده‌هایی در بازه با فضای باز طراحی شده و استفاده از آن بر روی داده‌های ترکیبی به دلیل قید مجموع ثابت و همبستگی متعاقب داده‌ها مشکلاتی را به همراه خواهد داشت، لذا تحقیقات متعددی برای یافتن یک تبدیل مناسب صورت پذیرفت [۲۱-۱۹] و پس از معرفی

روش‌هایی اعم از تبدیل لگاریتم ریشه‌ای افزایشی و مرکزی [۲۳]، در نهایت به روش تبدیل لگاریتم ایزومتریک [۲۱] دست یافتند. تبدیل لگاریتم ریشه‌ای افزایشی و مرکزی به ترتیب هرکدام به دلیل وابستگی به عنصر تقسیم شونده و ماتریس خروجی منفرد برای بسیاری از کارهای چند متغیره مناسب نبوده‌اند؛ اما در تبدیل لگاریتم ریشه‌ای ایزومتریک این مسائل برطرف شده و تنها در صورت لزوم تفسیر داده‌ها به صورت گرافیکی باید توسط تبدیل لگاریتم ریشه‌ای میان مرکز به فضای اصلی توسعه یابند [۲۵-۲۴، ۲۱].

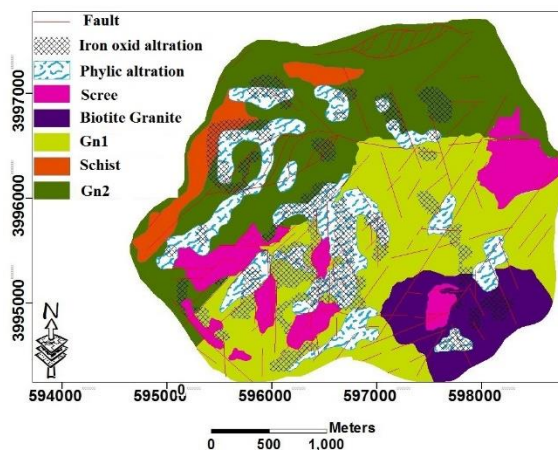
۲-۳- محدوده مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه در جنوب غربی شهرستان سقز از استان کردستان واقع در غرب ایران، بخشی از پهنه زمین

بدین ترتیب، به ازای عناصر Sn، Ag، Zn، Pb، Cu، Au، Mo و As به ترتیب مقادیر ۴۷۰ ppb، ۱۴۴ ppm، ۶۶ ppm، ۳۷۷ ppm، ۷ ppm، ۱۹ ppm، ۰٫۳۷ ppm، ۲۴۴ ppm به‌عنوان حد تشخیص و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف مشخص شدند. هیستوگرام و نقشه توزیع عیار متغیرهای ذکر شده به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. همچنین پارامترهای آماری مربوط به این متغیرها در جدول ۱ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که رسم کلیه نقشه‌ها در این تحقیق با استفاده از روش عکس مجذور فاصله شده است. طلا بیشترین مقدار را در سلول‌های شماره ۲۷۱، ۳۷۹، ۶۳۸، ۶۰۷، ۶۲۴ و ۱۰۲۴ دارد؛ که مقدار طلا در این سلول‌ها بیش از ۴۷۰ ppb گزارش شده و این‌ها با علامتی مجزا بر روی نقشه‌های ترسیم شده مشخص شده‌اند. بیشترین مقادیر مس مربوط به سلول‌های ۶۲۵، ۹۶۹، ۹۱۸ و ۱۰۲۱ بوده که در حدود ۰٫۳ درصد است و این نمونه‌ها نزدیک به هم برداشت شده‌اند.



شکل ۳: باکس پلات عناصر آنالیز شده.



شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی محدوده قره چر در مقیاس ۱:۵۰۰۰.

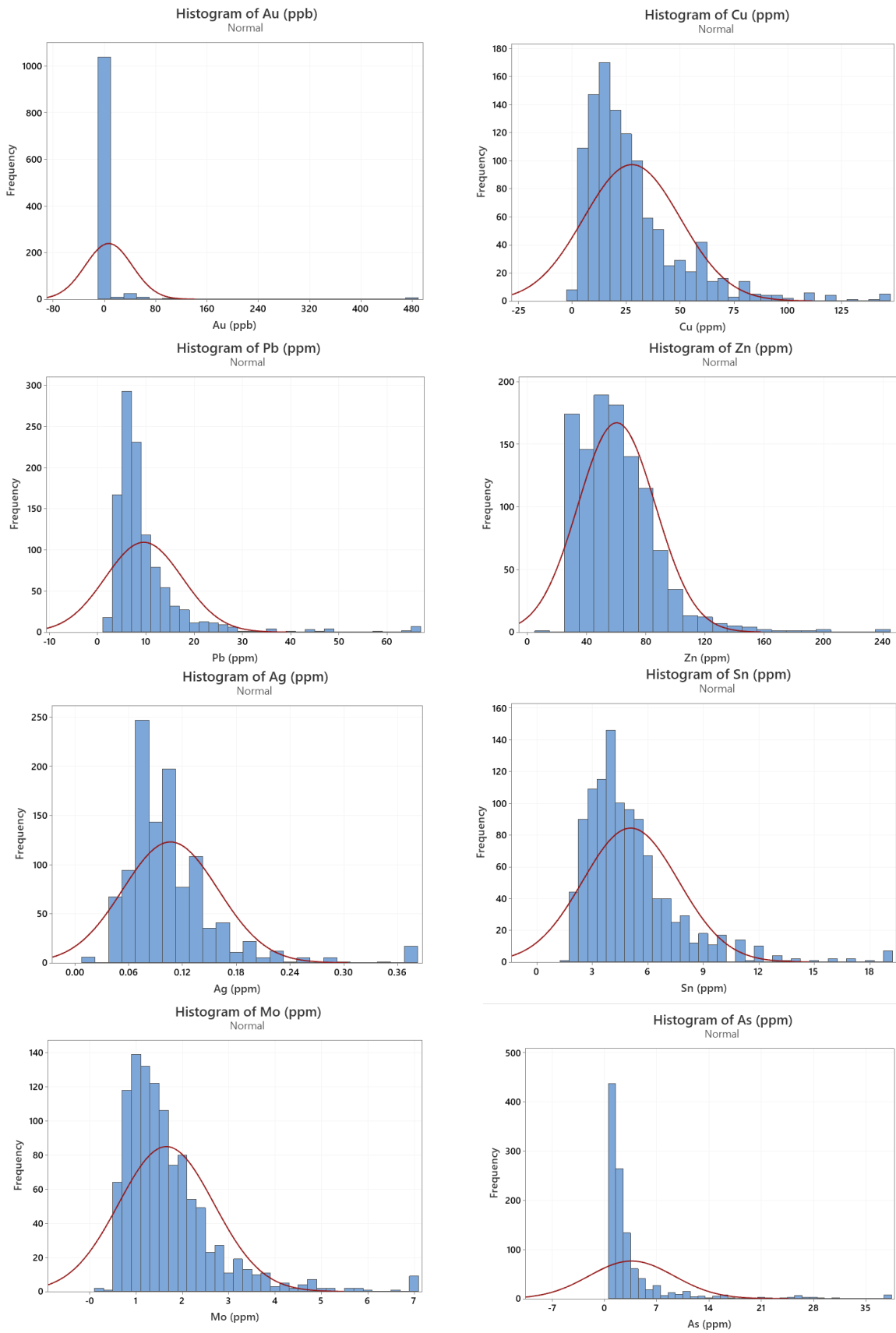
شناسی-ساختاری-سندج-سیرجان است. فرآیند دگرگونی و ماگماتیسیم آذرین به‌ویژه تزریق توده‌های آذرین گرانیتی از ویژگی‌های این پهنه است. این محدوده بر اساس مطالعات اکتشافات ژئوشیمیایی ناحیه‌ای در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ سقز و به همراه محدوده‌های قبغلوچه، حمزه قرنین، کرویان و قلقله تعیین گردیده است. در این منطقه سنگ‌های دگرگونی از منشأ آذرین اعم از گرانیت-گنایس‌های میلوئیتی، گرانیت‌های بیوتیت دار، شیست و گدازه‌های اسیدی دگرگون شده در حد ریولیت تا ریوداسیت وجود دارند. در بین واحدهای سنگی ذکر شده گرانیت-گنایس‌های میلوئیتی از بیشترین وسعت برخوردارند. دگرسانی غالب در این منطقه از نوع فیلیک و اکسیدهای آهن است که بخش وسیعی از محدوده را شامل می‌گردد. حضور کانه‌های فلزی علی‌رغم بزرگی و گسترش واحدهای گنایس و گرانیت به کانه‌های پراکنده و کم پیریت و کالکوپیریت محدود می‌شود که می‌تواند به دلیل تهی بودن ماگمای گرانیتی اولیه از آغستگی و آلودگی به ماده معدنی فلزی باشد.

تعداد ۱۱۰۴ نمونه لیتوژئوشیمیایی جهت آنالیز عناصر Au, As, Ag, Cu, Sb, Sn, Bi, Mo, Zn, Pb با روش جذب اتمی به آزمایشگاه ارسال و شبکه نمونه‌برداری به‌صورت سلول‌های مربعی با ابعاد ۵۰ متر (۵۱۵ سلول) و ۱۰۰ متر (۵۸۹ سلول) طراحی و نمونه‌های معرف هر سلول به روش لب‌بری برداشت گردید. تعداد ۹ نمونه مربوط به سلول‌های ۶، ۱۱، ۱۴۳، ۲۳۶، ۲۶۰، ۴۲۹، ۴۹۶، ۷۳۰ و ۹۹۷ در حین آماده‌سازی مفقود و از آنالیزها کنار گذاشته شد. در نهایت آنالیز بر روی ۱۰۹۵ نمونه صورت گرفت. جهت بررسی دقت آنالیز تعداد ۳۰ نمونه به‌عنوان نمونه تکراری برای آنالیز و تعداد ۵ نمونه جهت کنترل صحرائی آنومالی ژئوشیمیایی برداشت شد.

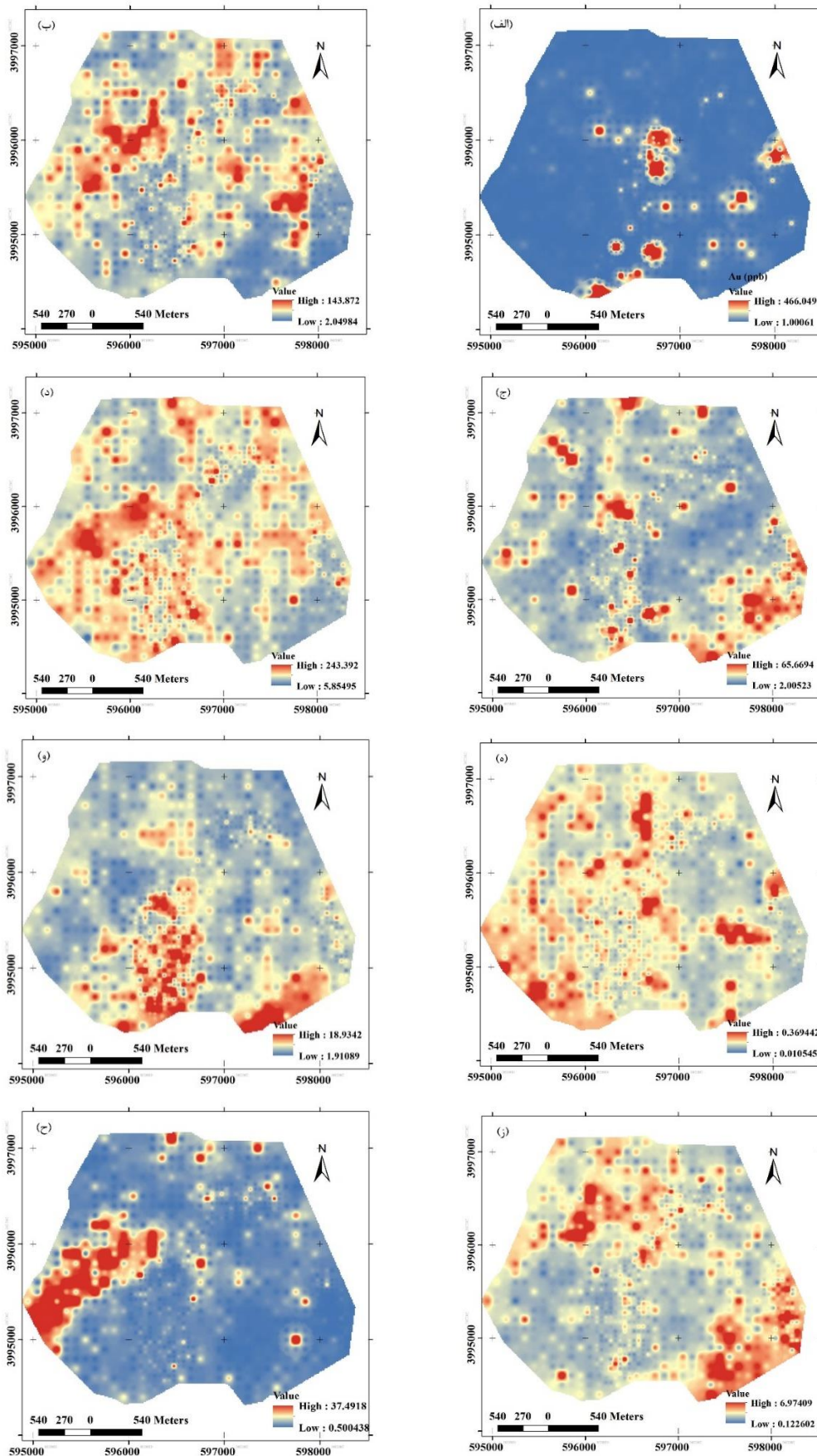
۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز تک عنصری

باکس پلات همه عناصر آنالیز شده در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر خارج از ردیف در این شکل به‌وضوح دیده می‌شود که بیشترین اختلاف و دوری از بدنه اصلی مربوط به عناصری چون طلا، مس و آرسنیک است. به همین منظور ابتدا، مقادیر خارج از ردیف به روش دورفل مشخص و جایگزین شدند. همچنین مقادیر سنسورد، با مقدار ۳٫۴ حد تشخیص دستگاه اعلام شده توسط آزمایشگاه جایگزین شدند.



شکل ۵: هیستوگرام متغیرهای Au، Cu، Pb، Zn، Ag، Sn، Mo، As



شکل ۶: نقشه توزیع عیار متغیرهای Au, Cu, Pb, Zn, Ag, Sn, Mo, As

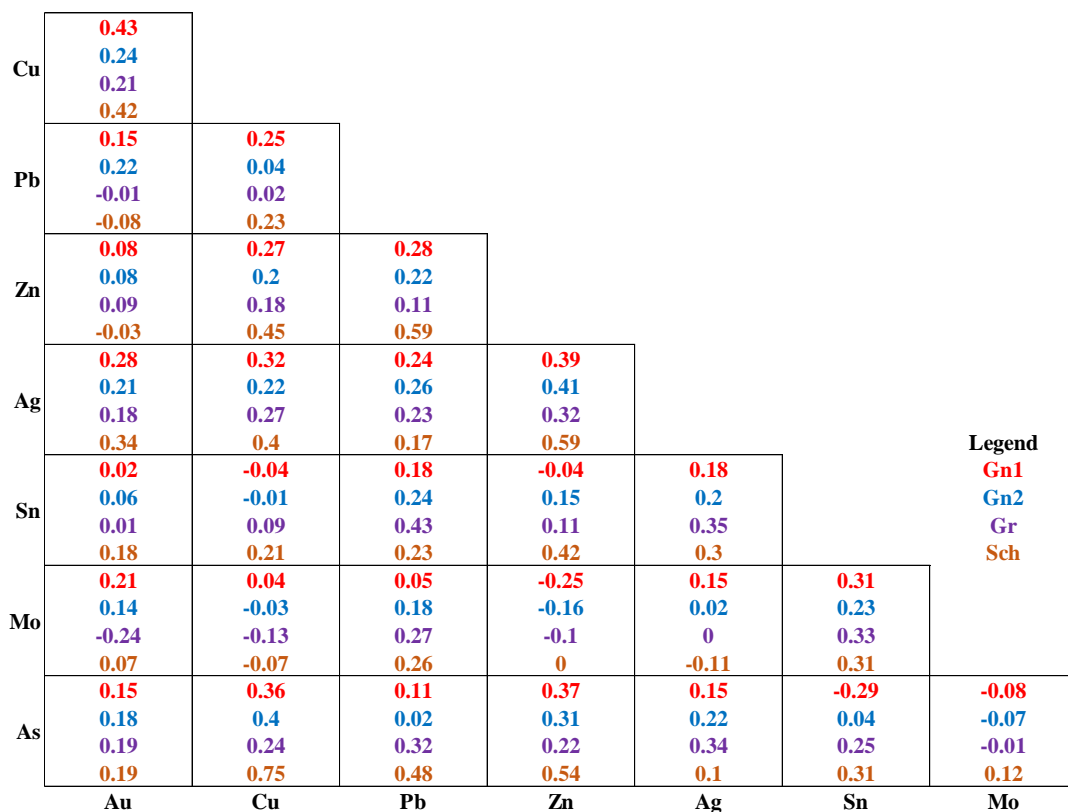
جدول ۱: پارامترهای آماری محاسبه شده به ازای متغیرهای Au, Cu, Pb, Zn, Ag, Sn, Mo, As

عنصر	تعداد نمونه‌ها	میانگین	واریانس	کمینه	بیشینه	چولگی	کشیدگی
Au (ppb)	۱۰۹۵	۶۷	۱۳۳۷۹۶	۱	۴۷۰	۱۱,۴۳	۱۳۹,۸۳
Cu (ppm)	۱۰۹۵	۲۷,۷۳	۵۰۵,۴۲۴	۲	۱۴۴	۱,۹۷	۵,۲۷
Pb (ppm)	۱۰۹۵	۹,۵۴۹	۶۳,۹۹۶	۲	۶۶	۴,۱۷	۲۲,۶۷
Zn (ppm)	۱۰۹۵	۶۰,۳۳	۶۸۴,۲۹۴	۵	۲۴۴	۱,۷۹	۶,۸۶
Ag (ppm)	۱۰۹۵	۰,۱۰۶۵۷	۰,۰۰۲۸۴	۰,۱	۰,۳۷	۲,۴۳	۸,۵۶
Sn (ppm)	۱۰۹۵	۵,۰۷۳۱	۶۷۰,۸۳	۱,۶	۱۹	۲,۱۱	۶,۷۸
Mo (ppm)	۱۰۹۵	۱,۶۵۴۵	۱,۰۵۹۱	۰,۱	۷	۲,۲۱	۶,۹۶
As (ppm)	۱۰۹۵	۳,۶۲۱	۳۲,۳۳۸	۰,۵	۳۷,۷	۳,۶۸	۱۵,۰۵

متفاوت وجود دارد که ضرایب همبستگی بین عناصر در هر نوع لیتولوژی و پارامترهای آماری به صورت جداگانه محاسبه و به ترتیب در شکل ۷ و جدول ۲ نشان داده شده است. واحدهای سنگی اصلی و مهم این منطقه همان طوری که در نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۴) نشان داده شده شامل گرانیت-گنایس‌های دگرگون شده، گرانیت‌های بیوتیت‌دار درشت‌دانه و شیست‌ها است که مهم‌ترین واحد آن گرانیت-گنایس‌های دگرگون شده است که با تفاوت در نوع کانی‌های آن‌ها به دودسته تقسیم شده‌اند (Gn1 و Gn2).

۲-۳- آنالیز چند عنصری

واضح است که زیرمجموعه‌های متفاوت در داده‌های سنگ منطقه معدنی قره‌چر که بر اساس لیتولوژی‌های متفاوت تعریف شده، ضرایب همبستگی متفاوتی را نشان بدهد. داده‌های لیتوژئوشیمیایی اغلب به شدت ناهمگن و تغییرپذیری زیادی دارند و معمولاً شامل ترکیبی از داده‌هایی با جمعیت‌های متفاوت که نماینده فرآیندهای ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی مختلفی است. در این منطقه ۴ نوع لیتولوژی



شکل ۷: ضرایب همبستگی بین عناصر به ازای هر کدام از واحدهای سنگی Gn1, Gn2, Gr و Sch.

جدول ۲: آماره‌های توصیفی متغیرهای Au، Cu، Pb، Zn، Ag، Sn، Mo، As به ازای واحدهای سنگی مختلف.

واحد سنگی	متغیر	میانگین	واریانس	کمینه	بیشینه	چولگی	کشدگی
Gn1	Au (ppb)	۸,۲۹	۱۹۱۳,۳۸	۱	۴۷۰	۹,۶۲	۹۷,۴۴
	Cu (ppm)	۲۶,۶۱۳	۴۰۲,۳۹۲	۲,۳	۱۴۴	۱,۸۵	۴,۵۲
	Pb (ppm)	۸,۸۳۱	۶۱,۹۳۵	۲	۶۶	۴,۷۹	۲۸,۱۴
	Zn (ppm)	۶۱,۸۴	۶۸۶,۹۹	۲۶	۲۴۴	۲,۱۴	۹,۶۵
	Ag (ppm)	۰,۱۰۳۵	۰,۰۰۲۳۸	۰,۰۱	۰,۳۷	۲,۳۴	۹,۰۹
	Sn (ppm)	۵,۵۱۶	۸,۴۶۲	۱,۶	۱۹	۱,۷۷	۴,۴۱
	Mo (ppm)	۱,۴۸۴۶	۰,۶۸۵۶	۰,۴	۷	۲,۳۷	۹,۶
Gn2	As (ppm)	۲,۶۷۴	۱۱,۵۷۵	۰,۵	۳۷,۷	۵,۵۸	۴۴,۱
	Au (ppb)	۳,۱۱۸	۸۲,۲۳	۱	۱۰۳	۸,۸۳	۸۹,۱۱
	Cu (ppm)	۳۶,۷۳	۷۵۰,۷۹	۲	۱۴۴	۱,۴۷	۲,۷
	Pb (ppm)	۹,۵۳۴	۵۷,۳۵۹	۲	۶۶	۴,۱۶	۲۳,۳
	Zn (ppm)	۶۱,۴۵	۷۸۰,۲۸	۳۰	۲۰۰	۱,۳۷	۳,۳۴
	Ag (ppm)	۰,۱۱۱۹	۰,۰۰۴۲۱	۰,۰۲	۰,۳۷	۲,۴۸	۶,۹۷
	Sn (ppm)	۴,۱۰۴	۲,۰۴۴	۲	۸,۸	۰,۷۳	۰,۳۴
Gr	Mo (ppm)	۱,۹۲۸۲	۱,۵۶۶۵	۰,۲	۷	۲,۰۶	۵,۳۳
	As (ppm)	۶,۵۸۴	۷۱,۳۴۶	۰,۵	۳۷,۷	۱,۹۳	۳,۰۷
	Au (ppb)	۴,۳۴	۱۲۳,۷۲	۱	۶۸	۴,۲۸	۱۸,۴۱
	Cu (ppm)	۱۶,۲۸	۳۶۵,۳۵	۲,۷	۱۱۰	۲,۸۴	۹,۲۶
	Pb (ppm)	۱۳,۴۳۸	۷۰,۵۷	۴	۵۸	۲,۴۱	۹,۴۹
	Zn (ppm)	۴۵,۷۱	۵۲۵,۲۴	۳۰	۱۶۰	۲,۹۸	۱۱,۲۷
	Ag (ppm)	۰,۰۸۹۵۳	۰,۰۰۲۴	۰,۰۵	۰,۳۷	۴,۴۹	۲۴,۱۶
Sch	Sn (ppm)	۵,۴۲۹	۵,۵۰۱	۲,۳	۱۹	۲,۵۷	۱۲,۴۷
	Mo (ppm)	۲,۶۸۱	۲,۱۳۵	۰,۷	۷	۱,۱۲	۱,۳۴
	As (ppm)	۱,۵۸۵	۱۶,۷۹۳	۰	۳۷,۷	۸,۳۱	۷۳,۱۸
	Au (ppb)	۲,۱۴۲	۲,۹۹۷	۱	۷,۱	۲,۴۲	۶,۷۳
	Cu (ppm)	۲۷,۵۹	۳۹۱,۸۲	۴,۲	۶۴	۰,۶۹	-۰,۳۵
	Pb (ppm)	۱۶,۷۸	۳۱۴,۱۹	۵,۳	۶۶	۲,۳۷	۵,۶۸
	Zn (ppm)	۶۴,۵	۹۶۳,۵۵	۳۰	۱۵۰	۱,۹۸	۵,۵۱
Sch	Ag (ppm)	۰,۱۲۷۵	۰,۰۰۲۵	۰,۰۵	۰,۲۳	۰,۶۹	۰,۷۵
	Sn (ppm)	۳,۹۰۸	۱,۰۸۴	۲,۴	۶,۳	۰,۸۱	۱,۵۵
	Mo (ppm)	۱,۷۹۲	۰,۱۵۴	۱,۱	۲,۳	-۰,۶۶	۰
	As (ppm)	۴,۵۵	۱۱۰,۳۷	۰,۵	۳۷,۷	۳,۳۹	۱۱,۶۱

۳-۳- تحلیل مؤلفه‌های اصلی

طلا بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده‌اند. در PC1 دو عنصر مس و آرسنیک بیشترین بار و در PC2 عنصر طلا با اختلاف بسیار زیادی خود را از دیگر عناصر جدا کرده است، این مسئله می‌تواند به ارتباط اندک طلا با سایر عناصر در

با توجه به جدول ۳ بارهای حاصل از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی داده‌های تحت تبدیل ilr در مؤلفه اول برای عناصر آرسنیک و مس و در مؤلفه دوم برای عنصر

۴-۳- بررسی نقشه توزیع تکینگی

توزیع تکینگی برای عناصر مهم با استفاده از نرم‌افزار متلب تهیه و در شکل ۹ ترسیم و نقشه‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش Quantile در ۵ کلاس طبقه‌بندی شد. مکان‌هایی با $2 > \alpha$ غنی‌شدگی عناصر را مشخص می‌کند که بر روی نقشه‌ها با رنگ قرمز نشان داده شده است. همچنان که می‌دانیم از ویژگی‌های این روش تقویت آنومالی‌ها است و الگوهای به‌دست‌آمده برای تعیین تپه‌شدگی و غنی‌شدگی موجود در منطقه مفید است.

همان‌طوری که در نقشه توزیع تکینگی طلا در شکل ۹ الف نشان داده شده است وسعت آنومالی‌های واقع در بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه و پس‌از آن در بخش شرقی وسیع‌تر از دیگر آنومالی‌ها هستند. لازم به ذکر است که آنومالی‌های معرفی‌شده تفاوت جایگاه و موقعیت دارند، بنابراین از روند لیتولوژی تبعیت نکرده و این تفاوت در ارتباط با ژنز کانی‌سازی یا دیگر فرآیندهای ژئوشیمیایی است. روند ساختاری غالب مشاهده‌شده در نحوه پراکندگی آنومالی‌های طلا در جهت شمالی - جنوبی است که با نحوه پراکندگی آنومالی‌های آرسنیک (شکل ۹ ب) متفاوت است. در این زون‌ها انطباق زیادی با کانه‌های سولفیدی از جمله پیریت و کالکوپیریت به چشم نمی‌خورد، اما آنومالی‌های بخش جنوبی و مرکزی منطقه هم‌جوار گسل‌ها، منطبق با آلتراسیون‌های فیلیک و اکسید آهن و سلول‌های پر عیار طلا به‌جز سلول شماره ۵ که میزان طلا در آن ۵۰۰ ppb گزارش شده است، است. نه در نقشه توزیع تکینگی طلا و نه در نقشه تکینگی حاصل از مؤلفه اصلی دوم که نشان‌دهنده طلا و عملکرد مستقل آن در منطقه قره چر است، این سلول جزء غنی‌شدگی‌ها معرفی نشده است. از خصوصیات این سلول قرارگیری بر روی واحد سنگی واریزه، عدم تطابق با آلتراسیون‌های فیلیک و اکسید آهن و کانی‌های سولفیدی شاخص کانی‌زایی است، بنابراین وجود مقدار بالای طلا در این سلول را می‌توان با عواملی از قبیل خطای آزمایشگاه، تمرکز سطحی محلول‌های گرمایی و مینرالیزه و یا سایر فرآیندهای ژئوشیمیایی در ارتباط دانست.

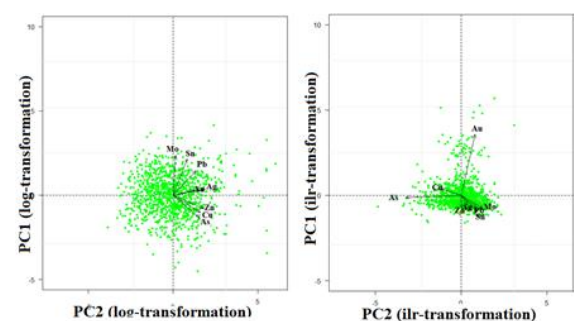
شکل ۹ ج مربوط به توزیع تکینگی مقادیر آلفا مربوط به عنصر مس در محدوده معدنی قره چر است که با توجه به نحوه پراکندگی سطوح غنی‌شده این عنصر می‌توان دریافت که به یک لیتولوژی خاص در منطقه مورد مطالعه محدود

این منطقه اشاره‌ای داشته باشد؛ اما بارهای حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی داده‌های لگاریتمی در مؤلفه اول برای عناصر مس، قلع و طلا و در مؤلفه دوم برای عناصر روی، آرسنیک و مولیبدن بیشترین مقدار را دارد که با توجه به توزیع بارها تغییرات معنی‌داری مشاهده نمی‌شود و روش اول تفکیک‌پذیری بهتری بین عناصر انجام داده است. شکل ۶ نشان‌دهنده نمودارهای دوتایی دو مؤلفه اصلی نخستین با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی مقاوم برای داده‌های لگاریتمی است که نشان‌دهنده سیستم بسته داده‌ها و عدم کفایت تبدیل لگاریتمی است، زیرا می‌توان دید که تقریباً همه عناصر تغییرات یکسانی دارند و درصد هیچ‌کدام از عناصر تفاوتی با سایر عناصر ندارد، بدین دلیل که وجود قید مجموع ثابت در داده‌های ترکیبی و همبستگی کاذب متعاقب داده‌ها در سیستم بسته، باعث می‌شود که اعمال روش‌های آنالیز استاندارد بر روی این داده‌ها نتایج نادرستی را به همراه داشته باشد. نمودار دوتایی مربوط به داده‌های تحت تبدیل ilr با تحلیل مؤلفه‌های اصلی مقاوم در شکل ۸ بیانگر همبستگی مس و آرسنیک بر روی مؤلفه اصلی اول و عملکرد مستقل طلا بر روی مؤلفه اصلی دوم است، که می‌تواند نشان‌دهنده کانی‌سازی اقتصادی طلا در این منطقه است.

جدول ۳: بارهای حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی

داده‌های تحت تبدیل ilr

PC2-log	PC1-log	PC2-ilr	PC1-ilr	
۰٫۷۷	۰٫۵۶	۰٫۸۹	۰٫۲۱	Au
-۰٫۱۲	۰٫۴۶	۰٫۱۰	-۰٫۳۱	Cu
۰٫۰۹	۰٫۱۱	-۰٫۱۹	۰٫۲۳	Pb
-۰٫۱۰	۰٫۱۳	-۰٫۱۹	۰٫۰۱	Zn
۰٫۰۱	۰٫۱۷	-۰٫۱۵	۰٫۰۹	Ag
۰٫۰۵	۰٫۰۲	-۰٫۲۴	۰٫۲۴	Sn
۰٫۱۵	۰٫۰۱	-۰٫۱۹	۰٫۳۳	Mo
-۰٫۵۹	۰٫۶۴	-۰٫۰۳	-۰٫۸۱	As

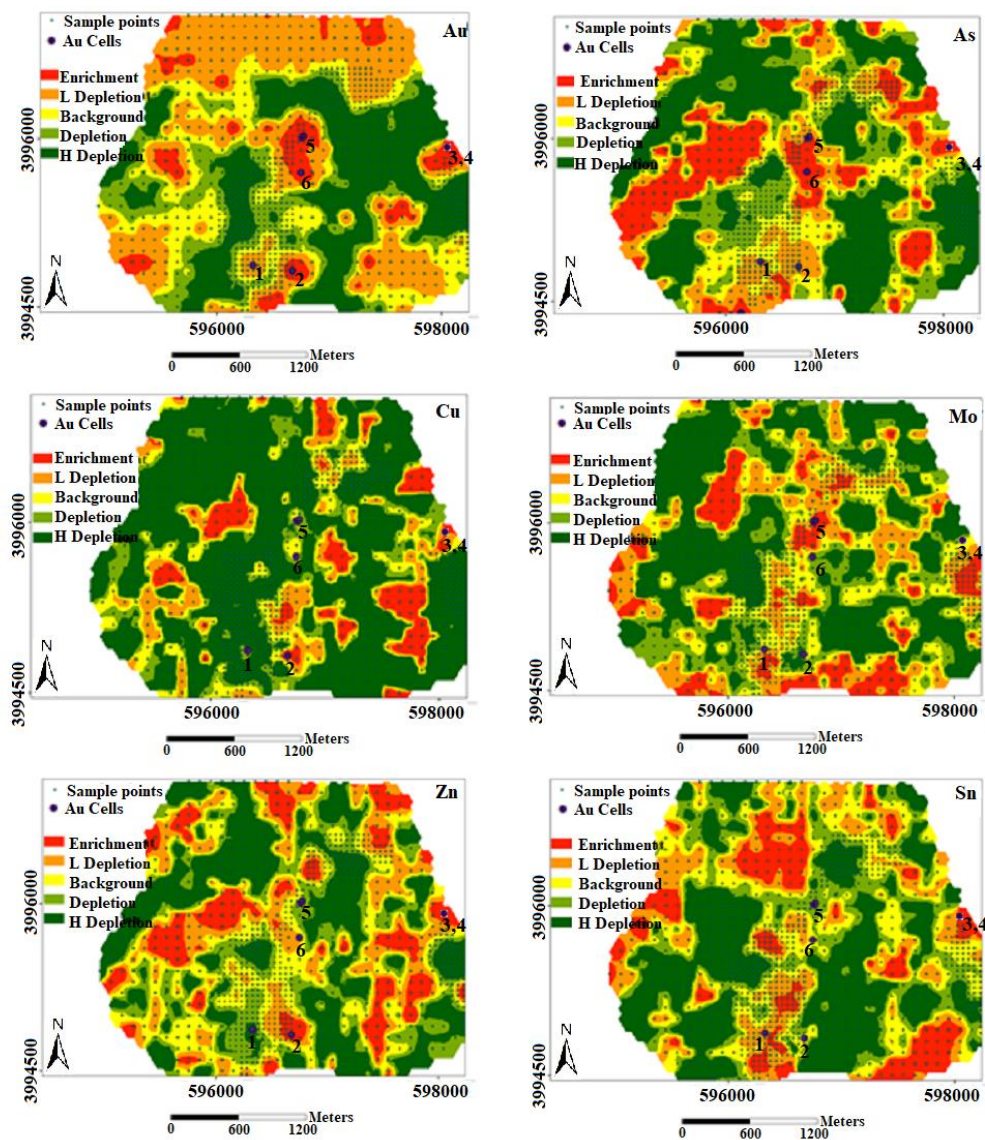


شکل ۸: نمودار دوتایی مربوط به PC مقاوم بر روی: (آ) داده‌های لگاریتم (ب) داده‌های تبدیل یافته با استفاده از ilr

جنوبی این مقادیر در حد زمینه و گاهاً تهی شدگی است. در این بین سلول‌های طلا دار اولویت ۲ و ۴ انطباق خوبی با غنی‌شدگی‌های آنتیموان نشان داده‌اند، برخلاف سلول‌های طلا دار بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه که در بخش‌های تهی شده آنتیموان واقع‌اند. در حقیقت از انطباق این شکل با نقشه توزیع تکینگی طلا می‌توان دریافت که تنها آنومالی‌های نیمه شمالی آنتیموان با سلول‌های پر عیار طلا هماهنگی دارند و با توجه به خصوصیات این عنصر می‌توان نتیجه گرفت که آنومالی‌های نیمه شمالی از تیپ کانی‌زایی هیدروترمال دما پایین یا همان اپی ترمال (دور از موتور حرارتی) بوده‌اند. شکل ۹ ه نقشه توزیع تکینگی عنصر قلع را نشان می‌دهد. قلع از نظر ماهیت ژئوشیمیایی با آنتیموان متفاوت و این عنصر بیشتر نزدیک به موتور حرارتی متمرکز شده، در صورتی که کمپلکس‌های آنتیموان در فواصل دورتری شکسته می‌شوند. در نتیجه با استفاده از این دو عنصر می‌توان به راحتی مرز حرارتی برای آنومالی‌های موجود در این منطقه را ترسیم کرد. نحوه تغییرات آنومالی‌ها به گونه‌ای است که از روند لیتولوژی تبعیت نمی‌کنند و از تطابق نقشه توزیع تکینگی قلع و آنتیموان می‌توان دریافت که در مکان‌های غنی‌شده قلع اکثراً میزان آنتیموان در حد زمینه بوده است. این سطوح غنی‌شده با سلول‌های طلا دار اولویت ۵ و ۶ یعنی در واقع آنومالی‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه هماهنگی دارند؛ بنابراین بر اساس نتایج حاصل از سطوح غنی‌شده این دو عنصر و ماهیت ژئوشیمیایی آن‌ها می‌توان بدین نتیجه رسید که حداقل دو تیپ کانی‌زایی متفاوت حرارتی طلا در منطقه مینرالی قره چر وجود دارد که هر یک مشخصات منحصر به فرد خود را دارند. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد قلع نیز مانند آنتیموان می‌تواند نقش ترمومتر کانی‌زایی احتمالی طلا را ایفا کند که بررسی غنی‌شدگی‌های این عنصر نشان می‌دهد که سلول‌هایی که حرارت بالایی را هنگام تشکیل متحمل شده‌اند در نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه واقع و ژنر احتمالی آن‌ها حرارت بالا و یا حرارت متوسط (مزو ترمال) است در حالی که ژنر سلول‌های طلا دار اولویت ۱ تا ۴ از نوع اپی ترمال تا مزو ترمال می‌تواند باشد.

نمی‌شود. بر اساس مقادیر توزیع شده الفا و غنی‌شدگی‌های نشان داده شده بر روی شکل ۹ می‌توان بیان نمود که آنومالی‌های مس و آرسنیک از نظر موقعیت با هم تطابق دارند با این تفاوت که از لحاظ وسعت آنومالی‌های مس محدوده کوچک‌تری را اشغال می‌کنند و این مسئله از تحرک بیشتر آرسنیک نسبت به مس ناشی می‌شود. از تطابق غنی‌شدگی‌های مس و سلول‌های طلا دار واقع در منطقه به این موضوع پی خواهیم برد که به جز سلول طلا دار اولویت ۳، بقیه سلول‌ها در قسمت‌های غنی‌شده مس واقع نشده‌اند. شکل ۹ د نقشه توزیع تکینگی عنصر مولیبدن را نشان می‌دهد. برخلاف نقشه توزیع تکینگی عنصر مس سطوح غنی‌شده آن دارای وسعت بیشتری بوده که از تحرک بیشتر مولیبدن نسبت به مس ناشی می‌شود. آنومالی‌های مولیبدن و مس با یکدیگر تطابق موقعیت نداشته، گویی که هر جا مس حضور داشته مولیبدن شسته شده و به عمق زمین فرو رفته است. روند ساختاری غالب غنی‌شدگی‌های این عنصر به جهت خاصی محدود نمی‌شود، به طوری که در بخش‌های جنوبی منطقه روند شرقی-غربی و در بخش‌های شمالی منطقه روند شمالی-جنوبی را به خود اختصاص داده‌اند. در بخش مرکزی و جنوبی با دو سلول پر عیار طلا اولویت ۴ و ۶، آلتراسیون‌های فیلیک، اکسیدهای آهن و کانه‌های سولفیدی هماهنگی دارد که از نظر تطابق با نقشه زمین‌شناسی و واحدهای لیتولوژی بر روی واحد گرانیت - گنایس میلوئیتی واقع شده است.

آنتیموان جز آن دسته از عناصری است که از بیشترین قدرت تحرک برخوردار است. این عنصر می‌تواند از بهترین ردیاب‌ها برای اکتشاف کانسارهای طلای تیپ هیدروترمال با درجه حرارت پایین محسوب شود، زیرا هاله تقریباً وسیع و بزرگی دارد و دور از موتور حرارتی تجمع می‌یابد. با دقت در شکل ۹ ح که توزیع تکینگی این عنصر را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که غنی‌شدگی‌های این عنصر بر روی لیتولوژی‌های متفاوتی قرار گرفته‌اند اما تمرکز آن‌ها بیشتر در بخش شمالی منطقه مینرالی قره چر است. روند ساختاری غالب آن‌ها مشابه با روند ساختاری عناصری چون مس و طلا بوده و مقادیر بالایی این عنصر در نیمه شمالی بر روی واحد گرانیت-گنایس میلوئیتی نوع دوم (Gn2) و در نیمه



شکل ۹: نقشه توزیع تکینگی به ازای عناصر Au، As، Cu، Mo، Zn و Sn

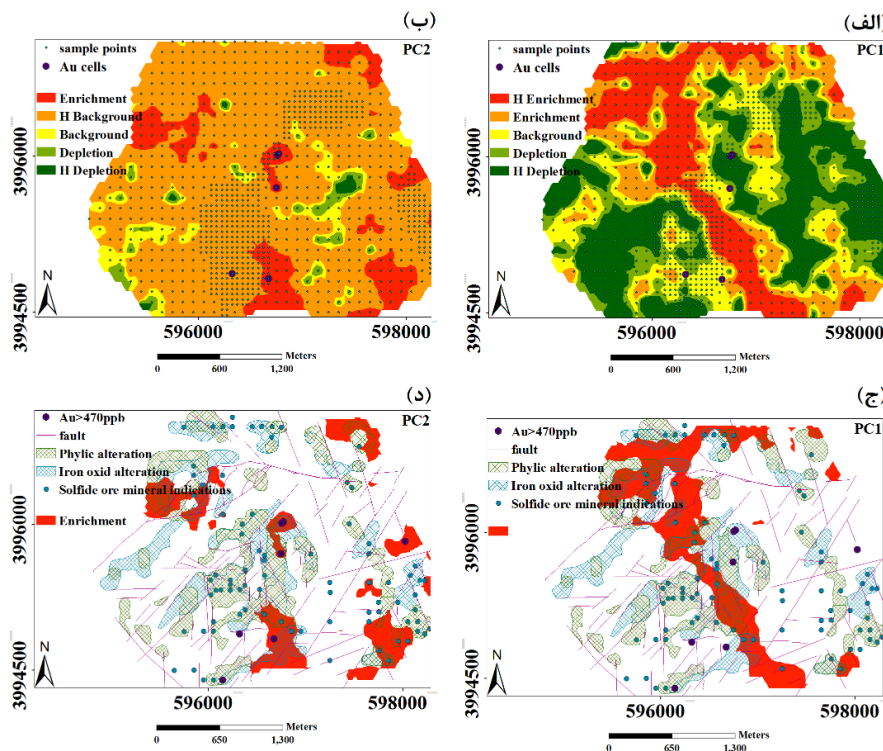
با توجه به مطالعات لیتوژئوشیمیایی صورت گرفته در این منطقه دو عنصر آرسنیک و مس نسبت به سایر عناصر همبستگی بهتری با طلا از خود نشان داده‌اند، با توجه به اینکه این عناصر تقریباً در حرارت‌های نسبتاً بالا و یا متوسط و نزدیک به منبع حرارتی تشکیل می‌شوند. این همبستگی تأییدی بر مرتبط بودن کانی‌زایی با توده‌های نفوذی حد واسط تا اسیدی بوده که آپوفیزها و رخنمون‌های آن در اغلب مناطق اکتشافی طلا دار کردستان به چشم می‌خورد.

شکل ۱۰ ب و د توزیع مقادیر آلفا برای مؤلفه دوم حاصل از تبدیل PCA-یلر که بیانگر عملکرد مستقل طلا در این منطقه است را نشان می‌دهد. منطقه معرفی شده علاوه بر سلول‌های پر عیار طلا چند منطقه جدید را نیز نشان می‌دهند که آنها در بخش‌های شرقی و جنوب غربی منطقه

شکل ۱۰ توزیع مقادیر آلفا حاصل از ارتباط بین عناصر Cu و As که به‌وسیله روش پنجره پایه تخمین زده شده است را به تصویر کشیده است. نتایج نشان می‌دهد که نقاط هدف ترسیم‌شده در مؤلفه اول با همه سلول‌های پر عیار طلا به‌جز سلول‌های اولویت ۵ و ۶ هماهنگی داشته و بر روی واحدهای لیتولوژی متفاوتی واقع شده‌اند، بنابراین از روند لیتولوژی تبعیت نمی‌کند و در همه بخش‌ها به‌جز بخش شرقی منطقه مورد مطالعه با آلتراسیون‌های فیلیک و اکسیدهای آهن و تراکم کانه‌های سولفیدی مطابقت دارد. مناطق معرفی شده عمدتاً هم‌جوار گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه هستند گویی که آنها همچون معبری برای عبور محلول‌های گرمابی مینرالیزه بوده‌اند.

با آلتراسیون‌ها می‌توان نتیجه گرفت این مناطق از اعتبار بالایی برای کانی‌زایی برخوردارند.

مورد مطالعه واقع‌اند. این مناطق از نظر وسعت بسیار وسیع نبوده و هم‌جوار گسل‌های منطقه و کانه‌های سولفیدی شاخص کانی‌زایی می‌باشند. با توجه به این شواهد و تطابق



شکل ۱۰: تطابق نقاط هدف PC1 و PC2 نسبت به سلول‌های پر عیار طلا (الف و ب) و دگرسانی‌های فیلیک و اکسید آهن و تراکم مانده‌های سولفیدی (ج و د).

تیپ کانی سازی مزوترمال (کوهزایی) در کانسارهای معروف کروبان و قلقله که در نزدیکی منطقه قره چر واقع شده‌اند می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کانی سازی تیپ درجه حرارت متوسط (مزوترمال یا همان تیپ کوهزایی) در این منطقه محتمل‌تر به نظر می‌رسد. لذا با در نظر گرفتن معیارهای اکتشافی طلای تیپ کوهزایی که کانی سازی طلا همراه با عناصر آرسنیک و آنتیموان و همچنین اکسیدهای آهن به صورت لنزی در مناطق شتر زون‌ها و همراه با سنگ میزبان دگرگونی نظیر گناس قرار دارند، می‌توان نوع اکتشافات بعدی در این منطقه را مشخص نمود.

مراجع

- [1] Cheng, Q., Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 2007. 32(1-2): p. 314-324.
- [2] Cheng, Q., Multifractality and spatial statistics. *Computers & Geosciences*, 1999. 25(9): p. 949-961.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از روش نقشه توزیع تکینگی بر روی این محدوده، مناطق امیدبخش و پرتانسیلی را برای عملیات اکتشافی بعدی معرفی نمود که با توجه به تطابق نتایج با آلتراسیون‌های فیلیک، اکسیدهای آهن، کانه‌های سولفیدی و سلول‌های پر عیار طلا می‌توانند از اعتبار بالایی برای کانه‌زایی برخوردار باشند. با توجه به این نقشه‌ها، آنومالی‌های عناصر مس و آرسنیک بیشتر در بخش جنوبی منطقه مورد بررسی نسبت به سایر عناصر انطباق بهتری با آنومالی‌های طلا می‌دارند، در حالی که در بخش شمالی منطقه آنومالی‌های آنتیموان بیشتر با آنومالی‌های طلا تطابق دارند. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و صرفاً با در نظر گرفتن تطابق آنومالی‌های ژئوشیمیایی عناصر خاص با طلا می‌توان بیان نمود که این منطقه دارای دو تیپ متفاوت کانه زایی هیدروترمال اعم از نوع حرارت متوسط (مزوترمال) تا حرارت بالا در نیمه جنوبی و نوع حرارت پایین (ایپی ترمال) تا حرارت متوسط (مزوترمال) در نیمه شمالی است؛ اما با در نظر گرفتن

- and Pb-Zn polymetallic mineralization in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012. 122: p. 90-100.
- [15] Zuo, R., et al., Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009. 101(3): p. 225-235.
- [16] Carranza, E.J.M., Usefulness of stream order to detect stream sediment geochemical anomalies. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004. 4(4): p. 341-352.
- [17] Carranza, E.J.M., *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS*. 2008: Elsevier.
- [18] Carranza, E.J.M. and M. Hale, A catchment basin approach to the analysis of reconnaissance geochemical-geological data from Albay Province, Philippines. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997. 60(2): p. 157-171.
- [19] Ghezelbash, R., A. Maghsoudi, and M. Daviran, Prospectivity modeling of porphyry copper deposits: recognition of efficient mono-and multi-element geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *Acta Geochimica*, 2019. 38: p. 131-144.
- [20] Muller, J., et al., The use of principle component analyses in characterising trace and major elemental distribution in a 55 kyr peat deposit in tropical Australia: Implications to paleoclimate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008. 72(2): p. 449-463.
- [21] Pearson, K., *Mathematical contributions to the theory of evolution. —on a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs*. *Proceedings of the royal society of london*, 1897. 60(359-367): p. 489-498.
- [22] Rollinson, H.R., *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. 2014: Routledge.
- [23] Egozcue, J.J., et al., Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical geology*, 2003. 35(3): p. 279-300.
- [24] Chen, G. and Q. Cheng, Singularity analysis based on wavelet transform of fractal measures for identifying geochemical anomaly in mineral exploration. *Computers & Geosciences*, 2016. 87: p. 56-66.
- [25] Aitchison, J., *The statistical analysis of compositional data*. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1982. 44(2): p. 139-160.
- [3] Agterberg, F., Q. Cheng, and G. Bonham-Carter, Application of a three-parameter version of the model of de Wijs in regional geochemistry. *GIS and Spatial Analysis*, edited by: Cheng, Q. and Bonham-Carter, GF, 2005: p. 291-296.
- [4] Cheng, Q., Multifractal imaging filtering and decomposition methods in space, Fourier frequency, and eigen domains. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2007. 14(3): p. 293-303.
- [5] Qiuming, C., Singular mineralization processes and mineral resources quantitative prediction: new theories and methods. *Earth Science Frontiers*, 2007. 14(5): p. 42.
- [6] Afzal, Peyman, et al. "Delineation of gold mineralized zones using concentration–volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran." *Ore Geology Reviews* 55 (2013): 125-133.
- [7] Almasi, Alireza, et al. "Prospecting of gold mineralization in Saqez area (NW Iran) using geochemical, geophysical and geological studies based on multifractal modelling and principal component analysis." *Arabian Journal of Geosciences* 8 (2015): 5935-5947.
- [8] Afzal, Peyman, Mohammad Abdideh, and Lili Daneshvar Saein. "Separation of productivity index zones using fractal models to identify promising areas of fractured reservoir rocks." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* (2023): 1-10.
- [9] Agterberg, F., Multifractal modeling of the sizes and grades of giant and supergiant deposits. *International Geology Review*, 1995. 37 : (۱) p. 1-8.
- [10] Mandelbrot, B.B., *Multifractal measures, especially for the geophysicist*. *Fractals in geophysics*, 1989: p. 5-42.
- [11] Afzal, P., A. Adib, and N. Ebadati, Delineation of seismic zonation using fractal modeling in West Yazd province, Central Iran. *Journal of Seismology*, 2018. 22: p. 1377-1393.
- [12] Afzal, P., et al., Correlation between rock types and Copper mineralization using fractal modeling in Kushk-e-Bahram deposit, Central Iran. *Geopersia*, 2018. 8(1): p. 131-141.
- [13] Xiao, F., et al., A spatially weighted singularity mapping method applied to identify epithermal Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization associated geochemical anomaly in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018. 189: p. 122-137.
- [14] Xiao, F., et al., Singularity mapping and spatially weighted principal component analysis to identify geochemical anomalies associated with Ag