

اکتشافات ژئوشیمیایی سنگی اندیس پلی متال هفت صندوق (شمال غرب تاکستان)؛ با تأکیدی بر روش فرکتالی

زهرا احتشام^۱، کمال سیاه چشم^{۲*}، وارطان سیمونز^۳، بهروز آهین^۴

۱- کارشناس ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه تبریز

۲- استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳- استادیار مرکز تحقیقات علوم پایه، دانشگاه تبریز

۴- کارشناس ارشد زمین شناسی اقتصادی، زمین فن آوران پویا

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۶/۲۸

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۶/۳/۱۵

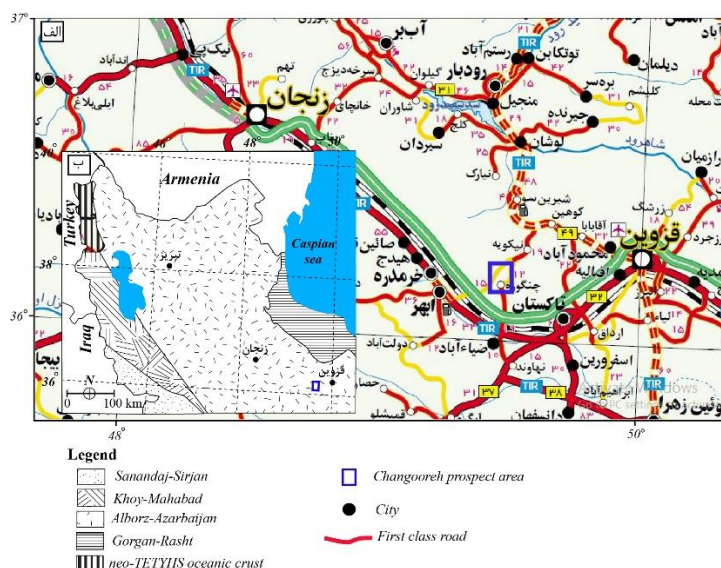
چکیده

اندیس اکتشافی هفت صندوق در ۲۵ کیلومتری شمال غرب تاکستان، در پهنه فلززائی ترشیاری طارم سفلی واقع شده است. تزریق نفوذی‌های گرانودیوریتی- مونزونیتی به درون مجموعه آتشفشانی- آذرآواری ائوسن سبب ایجاد دگرسانی گرمابی گسترده و کانی زائی مس- سرب و نقره بفرم غالب رگچه‌ای شده است. دگرسانی سوپرژن باعث تشکیل کانی‌های ثانویه اکسیدی-هیدروکسیدی (هماتیت، گوتیت)، سولفیدی (کولیت)، سولفاتی (آنگلریت) و کربناتی (مالاکیت و آزوریت) در زون کانی‌زائی اکسیدان شده است. در این محدوده تحلیل‌های ژئوشیمیایی سنگی به روش‌های مختلف بر روی نتایج آنالیز ICP-MS ۹۹ نمونه برداشت شده از یک شبکه سیستماتیک انجام گرفت. براساس روش‌های غیر ساختاری (ضرایب همبستگی، آنالیز خوشه‌ای، آنالیز فاکتوری) ۶ عنصر کانساری و ردیاب Cu، Pb، Ag، Au، Cd و As آنومالی نشان دادند در حالیکه روش‌های ساختاری (فرکتالی عیار- مساحت) گویای این واقعیت هستند که ۳ عنصر Cu، Pb و Ag از بین عناصر نامبرده دارای آنومالی واقعی بوده و بقیه عناصر به‌عنوان آنومالی کاذب در نظر گرفته می‌شوند. ماحصل این تحقیق نشانگر توانمندی روش‌های فرکتالی در تعیین حد آستانه‌ای دقیق و کاهش مساحت آنومالی‌ها در قیاس با روش‌های غیر ساختاری می‌باشد. طبق تحلیل فرکتالی log-log C-A سه زون دارای آنومالی در محدوده هفت صندوق تعیین شد: زون ۱) با آنومالی درجه دو عناصر Cu و Ag، زون ۲) با آنومالی درجه دو Cu و زون ۳) با آنومالی درجه دو Cu و درجه سه Pb.

واژه‌های کلیدی: فرکتال عیار مساحت، تحلیل فاکتوری، خوشه‌ای، هفت صندوق، تاکستان.

مقدمه

منطقه طارم سفلی واقع در زون فلززایی ترشیری البرز باختری-آذربایجان با داشتن سیستم گسترده دگرسانی گرمابی از جمله مناطق پتانسیل دار برای اکتشاف فلزات پایه می باشد از آن جمله می توان به رخداد کانسار مس خلیفه لو (فیضی و خاکزاد، ۱۳۷۶) و مس منطقه ماهین-طارم سفلی (ترکمانی، ۱۳۷۹) در این ناحیه اشاره کرد. منطقه هفت صندوق، در فاصله ۷۵ کیلومتری غرب قزوین و ۲۵ کیلومتری شمال غرب تاکستان پس از عبور از روستاهای حسین آباد و احمدآباد، در ۹ کیلومتری شرق جاده شوسه قابل دسترسی است (شکل ۱ الف). این محدوده با مختصات جغرافیایی $36^{\circ}11'09''$ عرض شمالی و $49^{\circ}29'19''$ طول شرقی در پهنه کانی زایی طارم سفلی واقع شده است. استفاده از روش های ساختاری (هندسه فرکتالی) برای جدا سازی زمینه از حد آستانه ای و تعیین آنومالی های ژئوشیمیایی موضوع تحقیقات نوین در مطالعات ژئوشیمیایی می باشد (سیم و همکاران، ۱۹۹۹؛ گنکالولز و همکاران، ۲۰۰۱؛ علی و همکاران، ۲۰۰۷؛ زوو و همکاران، ۲۰۰۹ و ونگ و همکاران، ۲۰۱۲) و در این پژوهش به مقایسه روش های مرسوم غیر ساختاری (آمار کلاسیک) با روش های مبتنی بر هندسه فرکتالی پرداخته شده است. در این راستا براساس یافته های به دست آمده از تجزیه ۹۹ نمونه ژئوشیمیایی سنگی ابتدا همبستگی دو متغیره عناصر محاسبه و مورد پردازش آمار چند متغیره با استفاده از آنالیز خوشه ای مهمترین پاراژنهای کانی سازی شناسایی و نهایتا با آنالیز فاکتوری، فاکتورهای کنترل کننده تغییرپذیری و آنومالی های موجود در منطقه شناسایی گردید. سپس جهت جداسازی آنومالی ها از روش ساختاری نوین فرکتال عیار- مساحت بهره گرفته شد که علاوه بر عیار، ساختار و موقعیت فضایی نمونه ها را در نظر می گیرد. هندسه فرکتال برای جداسازی آنومالی های ژئوشیمیایی سعی در تعیین غلظت بحرانی دارد که در محدوده آن بعد فرکتال تغییر می کند و این مقدار غلظت به عنوان حد آستانه ای در نظر گرفته می شود (حیدری و همکاران، ۱۳۹۳). این روش تغییرات سطح محصور منحنی ها را نسبت به تغییرات غلظت به صورت یک تابع نمایی می سنجد که ساختار فرکتالی داشته (سامی و ابد، ۲۰۰۱)، و رفتار مولتی فرکتالی توزیع یافته های ژئوشیمیایی در منطقه را مشخص می نماید. آنومالی زمینه عناصر که به طور معمول از توزیع های نمایی مختلف تبعیت می کنند، باعث ایجاد نمودارهای مولتی فرکتال می شوند که نشانگر میزان تغییرات در شرایط زمین- شناسی، ژئوشیمیایی، دگرسانی، هوازدگی سطحی، کانی سازی و به دنبال آن مراحل غنی شدگی عنصر است (گنکالولز، ۲۰۰۱). ابعاد فرکتالی در فرآیندهای زمین شناسی و ژئوشیمیایی با تغییرات در خصوصیات فیزیکی مانند نوع سنگ، تراکم رگه و یا جهت گیری آن ها، پدیده های دگرسانی، ویژگی های ساختاری و یا کانی شناسی غالب، و غیره مطابقت دارند (حیدری و همکاران، ۲۰۱۳). هدف اصلی این تحقیق نشان دادن برتری روش ساختاری فرکتالی عیار- مساحت برای جداسازی آنومالی های ژئوشیمیایی عناصر مختلف از زمینه در قیاس با روش های آمار کلاسیک می باشد.

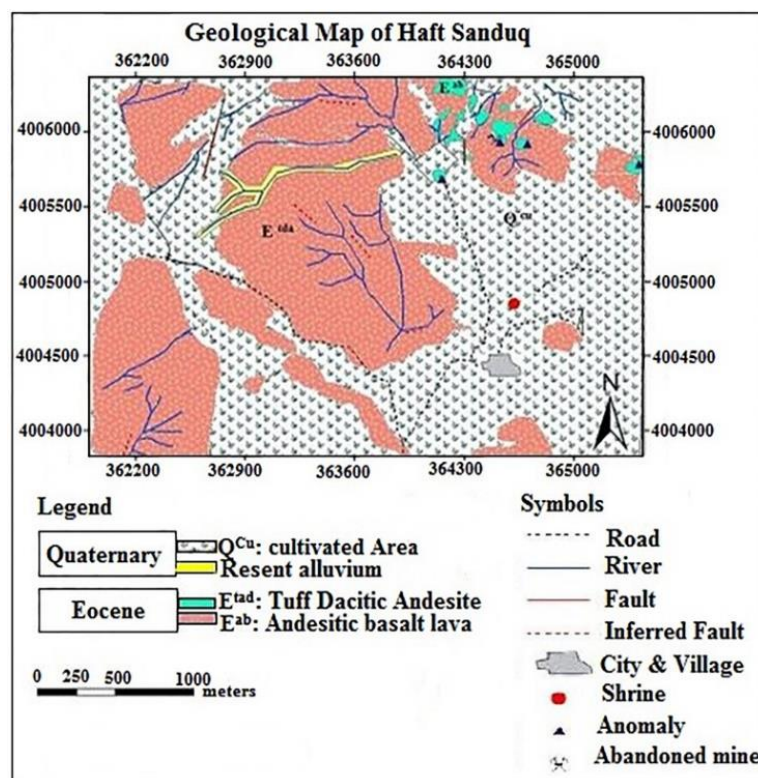


شکل ۱: الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مطالعاتی؛ ب) نقشه زون‌های ساختاری- رسوبی شمال غرب ایران (تلفیقی از علوی، ۱۹۹۱؛ آقانباتی، ۲۰۰۴) و موقعیت محدوده در زون البرز غربی- آذربایجان.

محدوده مورد مطالعه

زمین‌شناسی و کانی‌سازی محدوده مطالعاتی

منطقه هفت صندوق در پهنه رسوبی ساختاری البرز - آذربایجان (نبوی، ۱۳۵۵) واقع شده است (شکل ۱ ب). گستره این محدوده به‌طور غالب از سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری ائوسن میانی پوشیده شده است که از نظر سن و تشکیلات قرابت نزدیکی با سازند کرج دارد. واحدهای سنگی در رخنمون وسیعی از محدوده متشکل از سنگ‌های آندزیتی-بازالت، آندزیت و داسیت، توأم با میان لایه‌های پیروکلاستی و توف‌های آندزیتی-داسیتی سبز و قرمز می‌باشد که در قسمت‌های شمال غرب محدوده به رخساره آتشفشانی-رسوبی توف و لایه‌های آهکی تغییر یافته و مجموعه توسط رسوبات آبرفتی دوران چهارم پوشیده می‌شود (شکل ۲). تحلیل ساختاری ناحیه‌ای محدوده براساس گسله‌ها و درزه‌های غیر مرتبط و مرتبط با کانه‌زایی، نشان می‌دهد میدان تنش غالب حاکم بر منطقه دارای راستای شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد (علیجانی، ۱۳۹۴). سیالات ناشی از توده‌های نفوذی نیمه عمقی گرانودیوریتی-مونزونیتی منطقه باعث ایجاد کانی‌زایی هیپوژن زیرسطحی و سوپرژن در بخش‌های اکسیدان سطحی شده است. در این اندیس آثار کانی‌زایی ثانویه اکسیدی-هیدروکسیدی (هماتیت، گوتیت)، سولفیدی (کولیت)، سولفاتی (آنگلزیت) و کربناتی (مالاکیت و آزوریت) در داخل شکستگی‌ها به‌صورت رگچه-ای و یا آغشتگی سطحی قابل مشاهده است.



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ محدوده مورد مطالعه.

مواد و روش‌ها

به منظور شناسایی آنومالی‌های احتمالی عناصر فلزی در منطقه و تعیین مناطق امید بخش، در این مطالعه ۹۹ نمونه سنگی برداشت شده به روش لبپری به آزمایشگاه زر کاوان البرز در استان تهران ارسال و مورد آنالیز ۴۴ عنصری به روش ICP-MS قرار گرفتند. تعداد ۶ عنصر کانساری و ردیاب Cu, Ag, Pb, Au, Cd, As جهت مطالعه پارامترهای توزیع و آنومالی‌های احتمالی در سطح منطقه، انتخاب شده و به روش‌های تحلیل ژئوشیمیایی غیر ساختاری و ساختاری مورد بررسی قرار گرفتند. مقایسه نتایج به دست آمده از هر دو روش با یکدیگر و تطبیق آن‌ها با نقشه زمین‌شناسی منطقه منجر به تهیه نقشه آنومالی‌های عنصری و شناسایی محدوده آن‌ها گردید. قبل از انجام مطالعات به روش‌های غیر ساختاری و ساختاری ابتدا دقت و صحت آنالیز نمونه‌های ژئوشیمیایی بر روی ۱۲ نمونه تکراری به روش‌های دیگرام تاسون هوارث با نتایج کمتر از ۱۰ درصد خطا برای تمامی عناصر انجام گرفت سپس یافته‌ها قبل از ورود به محیط نرم افزارهای Excel و SPSS v.21 از لحاظ جداسازی یافته‌های سنسورد مورد پردازش قرار گرفتند. یافته‌های سنسورد در پردازش یافته‌های ژئوشیمیایی اختلال ایجاد می‌کنند چرا که اغلب تکنیک‌های آماری مهم، نیازمند مجموعه کاملی از یافته‌های عددی و غیر سنسورد می‌باشند، و بایستی با مقادیر عددی جایگزین گردند. در این مطالعه روش جایگزینی ساده بدین منظور انتخاب شد که برای این کار مقادیر بزرگتر از حد حساسیت در مرز بالایی با چهار سوم حد بالای حساسیت و مقادیر کمتر از حد حساسیت در مرز پایینی با سه چهارم کمترین حد حساسیت جایگزین می‌گردند. این روش هنگامی استفاده می‌شود که تعداد یافته‌های سنسورد نسبت به کل مقدار یافته‌ها ناچیز (کمتر از ۱۰٪) باشد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰).

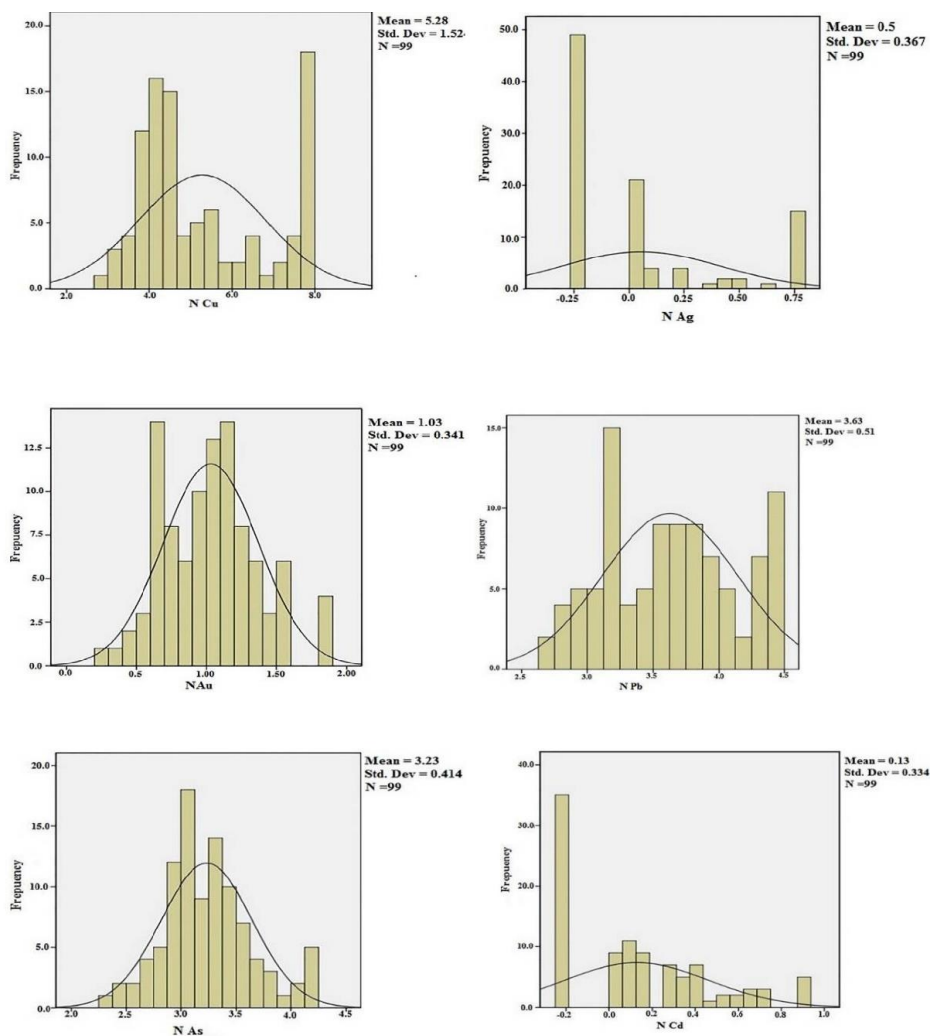
بحث و نتایج

بررسی روش های غیر ساختاری

اولین مرحله پردازش یافته های ژئوشیمیایی، بررسی پارامترهای آماری مربوط به تک تک عناصر جهت شناخت ماهیت توزیع هر یک از آنها می باشد که شامل محاسبه پارامترهای آماری از قبیل میانگین، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی، واریانس و غیره است (کلارک، ۱۹۸۷). از آنجائیکه استفاده از برخی روش های آماری منوط به نرمال بودن تابع توزیع متغیرهای مورد مطالعه و حذف نمونه های خارج از رده است (حسینی پاک، ۱۳۹۱) لذا برای شناسایی و حذف یافته های خارج از رده به روش ترسیمی از نمودارهای جعبه ای استفاده شد سپس از یافته های موجود، لاگ نرمال گرفته شد و پارامترهای آماری و هیستوگرام فراوانی برای یافته های نرمال شده تهیه شد (جدول ۱ و شکل ۳). به منظور شناسایی هرگونه ارتباط معنی دار بین تغییرات پارامترهای آماری عناصر، ضریب همبستگی یافته های خام و نرمال شده عناصر مورد مطالعه، به روش اسپیرمن و پیرسون در سطح اعتماد ۹۹٪ محاسبه گردید. بیشترین همبستگی مثبت بین عناصر مس با نقره با ضریب همبستگی $r > 0.70$ دیده می شود. این ضرایب بیانگر ارتباط پاراژنری بین این عناصر می باشند. برای محاسبه ضریب همبستگی اسپیرمن از یافته های خام عناصر استفاده شده است. گرچه نتایج محاسباتی این دو ضریب گاه متفاوت از هم هستند، به خصوص زمانی که مقدار یافته های خارج از رده زیاد باشد (ولمر، ۱۹۹۸)، اما مقایسه دقیق این دو ضریب در مطالعه حاضر نشان می دهد که اختلاف این دو ضریب همبستگی خیلی زیاد نیست و حاکی از تأثیر پذیری کم یافته ها از مقادیر خارج از رده و توزیع نسبتاً نرمال عناصر می باشد. به دلیل اینکه هر گروه از عناصر نسبت به یک سری شرایط محیطی کم و بیش به طور مشابه حساسیت نشان می دهند، شناخت ارتباط و همبستگی ژنتیکی متقابل بین عناصر مختلف می تواند در شناخت دقیق تر تغییرات موجود در محیط های ژئوشیمیایی به کار گرفته شود.

جدول ۱: محاسبه پارامترهای آماری یافته های نرمال عناصر مورد مطالعه برای ۹۹ نمونه.

یافته های نرمال					
عنصر	NAu	NAg	NAs	NCd	NCu
میانگین	۲/۹۷	۱/۱۳	۲۷/۷۲	۱/۲	۶۰۱/۱۰
میان	۲/۸	۱	۲۴/۰۴	۱/۱	۱۰۱/۴۹
مد	۱/۹۹	۰/۸۰۲	۱۷/۹۹	۰/۸۰۲	۳۱۴۳/۰۸
انحراف معیار	۱/۱	۰/۵	۱۳/۱۰	۰/۴۴۶	۸۳۳/۲۹
واریانس	۱/۲۲	۰/۲۵۱	۱۷۱/۶۵	۰/۱۹۹	۶۹۴۳۷۴/۹۹
کج شدگی	۱/۳۸	۱/۴۱	۱/۶۶	۱/۲۲	۱/۱۸
خطای کج شدگی	۰/۲۴۳	۰/۲۴۳	۰/۲۴۳	۰/۲۴۳	۰/۲۴۳
کشیدگی	۲/۲۸	۰/۴۳۸	۲/۷۶	۰/۸۹۰	۰/۴۳۸
خطای کشیدگی	۰/۴۸۱	۰/۴۸۱	۰/۴۸۱	۰/۴۸۱	۰/۴۸۱
حداقل	۱/۳۹	۰/۸۰۲	۶۸/۷۱	۰/۸۰۲	۱۶/۹۴
حداکثر	۶/۴۸	۲/۲	۲۷۴۵/۱۱	۲/۴۱	۳۱۴۳/۰۸
مجموع	۲۹۴/۶۴	۱۱۲/۶۹	۷۱/۶۸	۱۱۹/۳	۵۹۵۱۸/۱۷



شکل ۳: هیستوگرام فراوانی یافته‌های نرمال شده عناصر Cu, Ag, Pb, Au, Cd و As در منطقه هفت صندوق.

جدول ۲: ضرایب همبستگی محاسبه شده به روش الف) اسپیرمن برای یافته‌های خام و ب) پیرسون برای یافته‌های نرمال عناصر منتخب.

(الف)

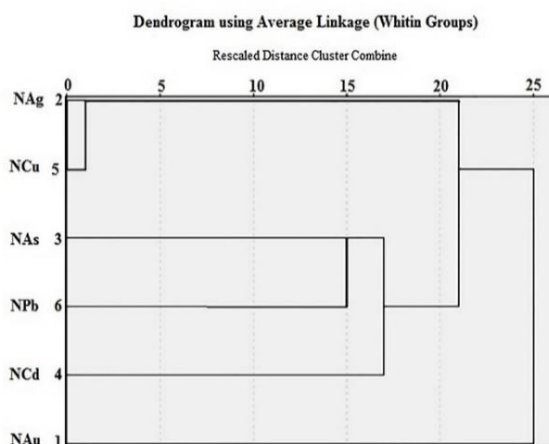
Au	۱					
Ag	۰/۳۲۱*	۱				
As	۰/۳۸۳**	۰/۵۲۶**	۱			
Cd	۰/۲۲۶*	۰/۳۴۱*	۰/۳۸۰**	۱		
Cu	۰/۲۴۴*	۰/۷۳۹**	۰/۳۸۱**	۰/۱۹۹*	۱	
Pb	۰/۱۷۹	۰/۵۳۴**	۰/۵۷۶**	۰/۴۷۸**	۰/۳۷۸**	۱
	Au	Ag	As	Cd	Cu	Pb

(ب)

NAu	۱					
NAg	۰/۲۹۵**	۱				
NAs	۰/۲۳۵*	۰/۵۱۴**	۱			
NCd	۰/۱۶۸	۰/۴۰۳**	۰/۴۹۴**	۱		
NCu	۰/۲۵۳*	۰/۷۴۰**	۰/۳۲۱**	۰/۲۱۰*	۱	
NPb	۰/۱۶۸	۰/۴۴۲**	۰/۵۵۸**	۰/۵۰۵**	۰/۳۸۱**	۱
	NAu	NAg	NAs	NCd	NCu	NPb

آنالیز خوشه‌ای

آنالیز خوشه‌ای یک روش آماری چند متغیره است که عناصر را براساس شباهت تغییر پذیری بین آن‌ها در قالب دسته‌ها یا گروه‌هایی طبقه‌بندی می‌کند. دلایل زیادی برای ارزشمند بودن آنالیز خوشه‌ای وجود دارد، از جمله آن که آنالیز خوشه‌ای می‌تواند در یافتن گروه‌های پاراژنتیک واقعی عناصر راهگشا باشد و همچنین باعث کاهش تراکم یافته‌ها شود. با توجه به نمودار خوشه‌ای رسم شده در شکل ۴ می‌توان تشخیص داد که عناصر کانساری و ردیاب در دو خوشه مختلف قرار گرفته‌اند: خوشه اول (Ag, Cu) و خوشه دوم (As, Cd, Pb, Au)؛ که طبق چنگ و همکاران (۱۹۹۴) این خوشه‌ها بیانگر ارتباط پاراژنتی بین این عناصر می‌باشد. کانی‌سازی Cu و Ag به ترتیب در ارتباط ژنتیکی با کانی‌سازی (As, Au) و (Cd, Pb) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴: دندوگرام حاصل از آنالیز خوشه‌ای بر روی عناصر انتخابی.

آنالیز فاکتوری

هدف از آنالیز فاکتوری تشخیص اصلی‌ترین متغیرهای کنترل کننده (علتی) از متغیرهایی با نقش کمتر (فرعی) است. در این صورت می‌توان با حداقل تعداد متغیرهای فاکتوری، حداکثر تغییرپذیری بین یافته‌ها را توجیه کرد و سهم نسبی هر یک از متغیرهای فاکتوری را با توجیه تغییر پذیری مشخص نمود (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). جهت مطالعه آنالیز فاکتوری در منطقه هفت صندوق، با استفاده از نرم افزار SPSS، یافته‌های نرمال

شده ۶ عنصر انتخابی به جهت درک نحوه همبستگی آنها مورد آزمون KMO و بارتلت قرار گرفتند. ملاک اصلی در انتخاب هر فاکتور مقادیر عددی بالای ۰/۵ می باشد و مقادیر کمتر از ۰/۵ از سطح غیر قابل اطمینانی برخوردارند (خواجه میری و همکاران، ۱۳۹۲). طبق جدول ۳، این مقدار در یافته های منطقه ۰/۷۴۰ بدست آمد که بیانگر اعتبار متعادل تا بالایی آنالیز فاکتوری برای یافته های مورد مطالعه است. مطابق جدول ۴، میزان مشارکت پذیری عناصر مس و نقره ۷۹۰ > می باشد. جدول ۵، واریانس کل دو مولفه را به میزان ۴۸/۹۰۹٪ و ۱۷/۷۳۶٪ معرفی می کند. همان طور که ملاحظه می شود درصد تجمعی واریانس محاسبه شده برای ۲ مولفه معادل با ۶۶/۶۴۵٪ می باشد که بالای ۵۰ درصد قابل قبول بوده و آنالیز فاکتوری را تایید می کند. براساس جداول ۵ و ۶ با بررسی پاراژنزی و ویژگی های ژئوشیمیایی عناصر تشکیل دهنده هر فاکتور، دو فاکتور تأثیرگذار بشرح زیر در منطقه رخ داده است:

۱- فاکتور اول: شامل عناصر Cu و Ag می باشد واریانس تجمعی این فاکتور ۳۵/۵۱٪ می باشد.

۲- فاکتور دوم: با واریانس تجمعی ۳۱/۱۳٪، متشکل از عناصر Au، Pb، Cd، As بوده و به عنوان ردیاب های دما پایین طلا محسوب می شوند. باید اشاره کرد که این فاکتور بیشترین همبستگی را با عنصر Cu در فاکتور اول نشان می دهد.

جدول ۳: تست KMO و بارتلت عناصر

KMO and Bartlett's Test		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		۰/۷۴۰
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	۱۹۵/۹۹۵
	Df	۱۵
	Sig.	۰

جدول ۴: میزان مشارکت پذیری عناصر در آنالیز فاکتوری

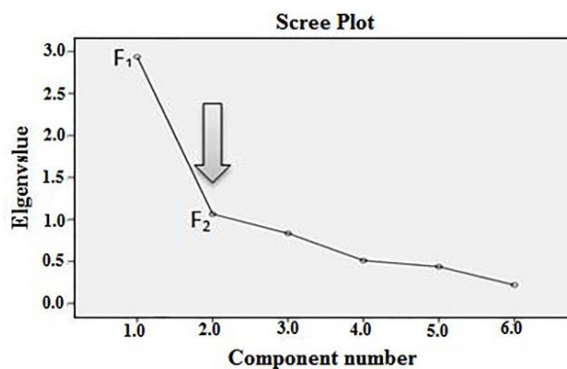
Communalities		
	Initial	Extraction
NAu	۱	۰/۳۴۶
NAg	۱	۰/۸۱۱
NAs	۱	۰/۶۷۵
NCd	۱	۰/۶۷۶
NCu	۱	۰/۷۹۳
NPb	۱	۰/۶۹۷

جدول ۵: مقادیر ویژه، واریانس و واریانس تجمعی هر فاکتور

Total Variance Explained									
Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
۱	۲/۹۳۵	۴۸/۹۰۹	۴۸/۹۰۹	۲/۹۳۵	۴۸/۹۰۹	۴۸/۹۰۹	۲/۱۳۱	۳۵/۵۱۵	۳۵/۵۱۵
۲	۱/۰۶۴	۱۷/۷۳۶	۶۶/۶۴۵	۱/۰۶۴	۱۷/۷۳۶	۶۶/۶۴۵	۱/۸۶۸	۳۱/۱۳۰	۶۶/۶۴۵
۳	۰/۸۳۴	۱۳/۹۰۳	۸۰/۵۴۸						
۴	۰/۵۱۰	۳/۵۰۸	۸۹/۰۵۶						
۵	۰/۴۳۷	۷/۲۹۱	۳۴۶/۹۶						
۶	۰/۲۱۹	۳/۶۵۴	۱۰۰						

جدول ۶: ماتریس مولفه چرخش

Rotated Component Matrix ^a		
	Component	
	۱	۲
NAu	۰/۶۶۰	۰/۵۸۴
NAg	۰/۴۱۹	۰/۷۹۷
NAs	۰/۷۶۹	۰/۲۹۰
NCd	۰/۸۱۸	۰/۰۸۴
NCu	۰/۱۴۳	۰/۸۷۹
NPb	۰/۸۱۸	۰/۱۶۶



شکل ۵: نمودار صخره‌ای تاییدی بر تعیین تعداد فاکتورها.

ترسیم نقشه‌های آنومالی مستخرج از روش‌های غیر ساختاری

هدف نهایی انجام مطالعات اکتشافی به تهیه نقشه آنومالی عنصری بر مبنای تکنیک‌های آماری ختم می‌شود و نقش ارزنده‌ای در تعیین مناطق امید بخش ایفا می‌نماید. در این بخش به تشریح پراکنش ژئوشیمیایی و آنومالی‌های عناصر مورد آنالیز می‌پردازیم. برای نیل به این مقصود، نقشه‌های پراکنش و آنومالی‌های عناصر مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Surfer V.11 تهیه شده‌اند (شکل ۶). مقادیر زمینه، حد آستانه و آنومالی عناصر انتخابی (بعد از حذف مقادیر خارج از رده و نرمال سازی یافته‌ها) به روش برآورد حد آستانه براساس

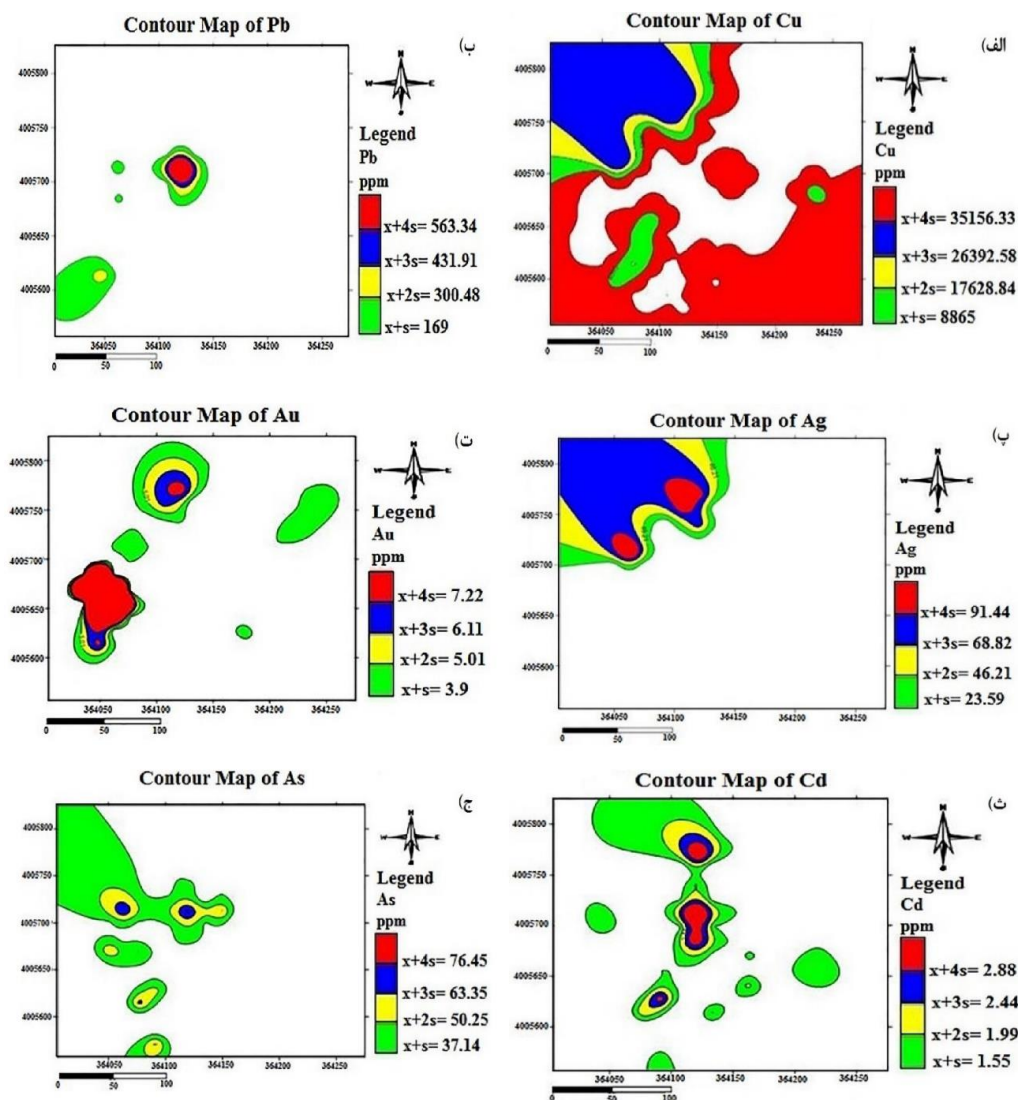
مقادیر میانه X و انحراف معیار S محاسبه گردید. در مورد جدایش آنومالی از مقادیر زمینه از فرمول $X+nS$ استفاده شده است طوری که $X+S$ به عنوان حد آستانه‌ای و مقادیر بیشتر از آن به عنوان درجات مختلف آنومالی‌ها محاسبه شدند (جدول ۷).

جدول ۷: جداسازی مقادیر زمینه از آنومالی ۶ عنصر منتخب در نمونه‌های آنالیز شده ذخیره هفت صندوق.

Element	X	S	X+S	X+۲S	X+۳S	X+۴S
N Au	۲/۸۰	۱/۱۰	۳/۹۰	۵/۰۱	۶/۱۱	۷۸۷۱/۲۵
N Ag	۱	۰/۵۰	۱/۵۰	۲	۲/۵۰	۱۰۱۸۱/۷۲
N As	۲۴/۰۴	۱۳/۱۰	۳۷/۱۴	۵۰/۲۵	۶۳/۳۵	۱۲۴۹۲/۱۹
N Cd	۱/۱۰	۰/۴۴	۱/۵۵	۱/۹۹	۲/۴۴	۶۷۱/۶۱
N Cu	۱۰۱/۴۹	۳۸۸/۲۹	۹۳۴/۷۸	۱۷۶۸	۲۶۰۱/۳۶	۱۶۰۳۰
N Pb	۳۸/۰۹	۲۲/۲۴	۶۰/۳۳	۸۲/۵۸	۱۰۴/۸۲	۹۱۸۴/۰۸

تعیین آنومالی عناصر

نقشه‌های آنومالی ترسیم شده بر مبنای پارامترهای آماری غیر ساختاری (شکل ۶) نشان می‌دهد که عناصر Cu، Pb، Ag، Au و As دارای آنومالی‌های پراکنده در سطح منطقه می‌باشند آنومالی عنصر مس در بخش‌های جنوب شرقی و جنوب غربی با آنومالی درجه ۲ و در بخش شمال غربی با آنومالی درجه ۳ نمود پیدا کرده است (شکل ۶ الف). آنومالی عنصر سرب محدوده کوچکی در بخش مرکزی منطقه را دربر می‌گیرد ولی از نوع آنومالی درجه ۲ می‌باشد (شکل ۶ ب). آنومالی نقره در بخش‌های شمال غربی منطقه در محدوده کوچکی با درجه ۲ و بخشی به صورت آنومالی درجه ۳ در شکل ۶ پ. نشان داده شده است. آنومالی عنصر طلا با درجه ۲ بخش کوچکی را در جنوب غربی سطح منطقه به خود اختصاص داده است (شکل ۶ ت). آنومالی عنصر کادمیوم با درجه ۲ وسعت کمی از بخش‌های مرکزی محدوده را شامل است (شکل ۶ ث)، در نهایت عنصر آرسنیک که مطابق شکل ۶ ج، آنومالی قابل ذکری را نشان نمی‌دهد.



شکل ۶: نقشه‌های آنومالی عناصر مورد مطالعه در منطقه هفت صندوق مستخرج از روش‌های تحلیل غیر ساختاری.

بررسی روش‌های ساختاری

در روش‌های ساختاری علاوه بر عیار، موقعیت فضایی یافته‌ها نیز لحاظ می‌شود. به خاطر ماهیت فرکتالی توزیع عناصر در طبیعت نیازی به نرمال‌سازی یافته‌های خام و حذف مقادیر خارج از رده نیست زیرا به دلیل ماهیت فرکتالی یافته‌های مربوطه به طور خودکار کنار گذاشته می‌شوند (اگتبرگ و همکاران، ۱۹۹۶؛ تورکوت، ۱۹۹۷؛ گنکالولز، ۲۰۰۱). برای جدایش جامعه آنومالی غلظتی بحرانی که در محدوده آن بعد فرکتالی تغییر می‌کند (یعنی از بعد کمتر مربوط به جامعه زمینه با سطح ژئوشیمیایی هموار به بعد بیشتر مربوط به جامعه آنومالی با سطح ژئوشیمیایی ناهموار) به عنوان حد آستانه‌ای معرفی می‌گردد. بنابراین در این روش از توزیع فراوانی عناصر و شکل هندسی آنومالی در کنار هم برای تشخیص حد آستانه‌ای و جدایش جامعه آنومالی و زمینه استفاده می‌گردد. گام نخست ترسیم نمودار عیار - مساحت است که بصورت ترکیب از دو (یا چند خط) در می‌آید. در واقع این دو خط نماینده جوامع زمینه و آنومالی است که دو شیب مختلف دارند مرز بین دو خط دارای عیاری

است که معرف حد آستانه‌ای می‌باشد. برای رسم نمودارهای عیار - مساحت ابتدا لازم است نقشه‌های کنتوری هم عیار یا نقشه‌های شبکه‌بندی شده منطقه اکتشافی تهیه شود. اگر مقدار هر کن تور عیاری برابر با V در نظر گرفته شود، می‌توان یک معادله توانی به صورت رابطه ۱ برای تمرکز عناصر با خواص فرکتال ارائه نمود (چنگ و همکاران، ۱۹۹۴):

رابطه ۱)

$$A (\geq V) \sim V^{-\alpha}$$

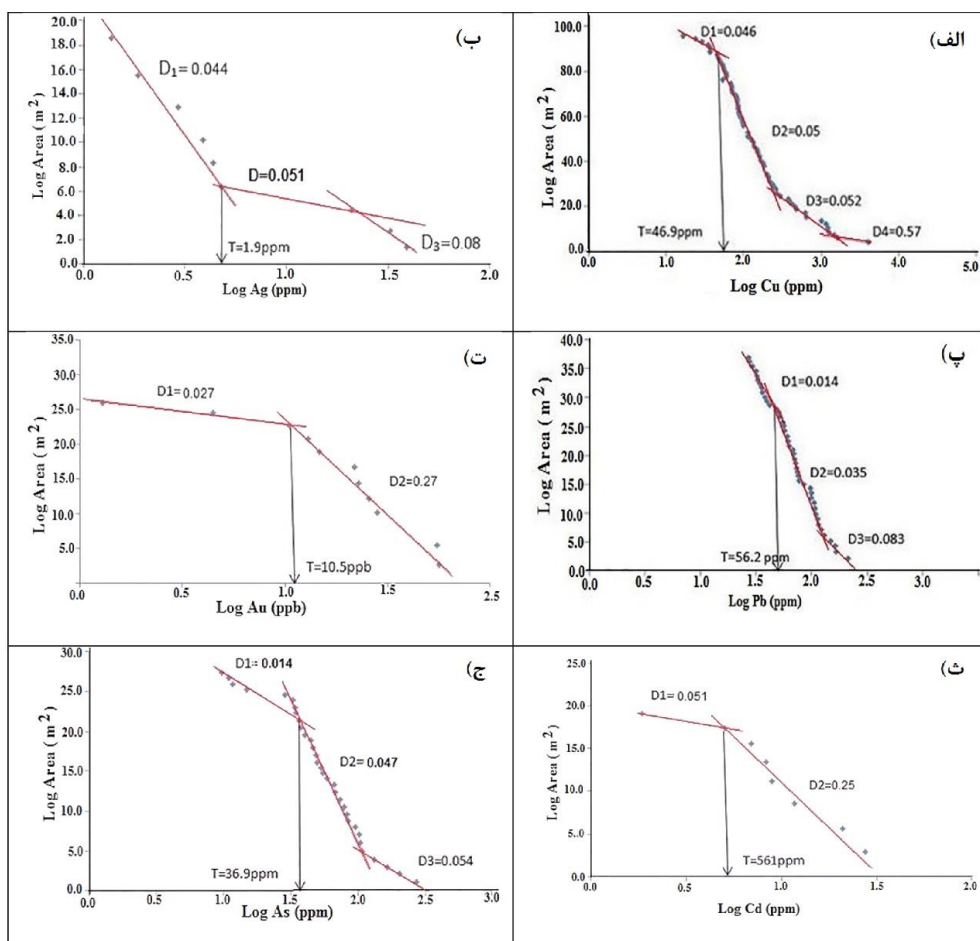
$A (\geq V)$ مساحت تجمعی محصور شده توسط خطوط هم عیاری است که عیار متناظر آن‌ها بزرگتر یا مساوی V است. مقدار α نیز نمایانگر بعد فرکتال مربوط به دامنه‌های متفاوت V می‌باشد. با ترسیم تغییرات مساحت در برابر عیار در نمودار لگاریتمی است نقاطی به دست می‌آیند که منحنی در آن‌ها تغییرات شیب تند (شکست) نشان می‌دهد که محل این تغییر شیب‌ها نمایانگر تغییر از زمینه به آنومالی‌های با درجات مختلف و به تبع آن تغییرات در شرایط زمین‌شناسی به خصوص کانی‌سازی است (اگتبرگ و همکاران، ۱۹۹۶). جهت درون یابی یافته‌های اکتشافی ژئوشیمیایی سنگی می‌توان از روش‌های معمول کریجینگ، عکس مجذور فاصله و یا روش‌های دیگر استفاده کرد و نقشه‌های کن توری را ترسیم نمود. در این تحقیق بمنظور ترسیم نقشه‌های کن توری در منطقه اکتشافی از روش عکس مجذور فاصله با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS V.10 استفاده شده تا بتوان مقدار عیار و مساحت هر خط تراز را محاسبه کرد. لذا هر سلول عیار و مساحتی مشخص را در معرض نمایش قرار می‌دهد. مقادیر عیار به ترتیب صعودی مرتب شده و برای عیارهای تکراری فقط یکی از آن‌ها به همراه مجموع مساحت همه سلول‌هایی که آن عیار را دارند در جدول باقی مانده است. سپس برای هر عیار معین، مساحت‌ها به صورت تجمعی محاسبه شده است. پس از انجام این محاسبات، نمودار لگاریتمی عیار - مساحت ترسیم و از روی آن حد آستانه‌ای و آنومالی‌ها تعیین شده است. در این نمودارها با افزایش عیار کن تور، مساحت کل محصور در داخل خط تراز کاهش می‌یابد. با استفاده از این خطوط کن توری می‌توان مقدار بهینه حد آستانه‌ای را برای جداسازی آنومالی از زمینه به وسیله نمودار تمام لگاریتمی عیار - مساحت تخمین زد. بر این اساس منحنی‌های لگاریتمی عیار - مساحت برای ۶ عنصر Cu، Ag، Pb، Au، As، Cd در محدوده مورد مطالعه ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

تفسیر ژئوشیمیایی نمودار لگاریتمی عیار - مساحت

در نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر مس می‌توان ۳ نقطه شکست شاخص و ۴ مرحله غنی شدگی این عنصر در ذخیره را به دلیل رفتار مولتی فرکتالی آن مشاهده نمود (شکل ۷ الف). حد آستانه‌ای هر عنصر عنوان عیاری روی نمودار است که در آن شیب خط با افق اختلاف قابل توجهی پیدا می‌کند. برای عنصر مس حد آستانه‌ای برابر ۴۶/۹ ppm می‌باشد بر این اساس کمتر از این مقدار در محدوده زمینه بوده و دارای مرحله غنی‌سازی ضعیف در منطقه می‌باشد، و بیشتر از آن در حدفاصل ۶۴۵/۴-۷۴۰ ppm غنی‌سازی مناسب و ۷۴۰ > به عنوان غنی‌سازی قابل توجه در نظر گرفته می‌شود. در نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر نقره می‌تواند ۲ نقطه شکست شاخص و ۳ مرحله غنی شدگی این عنصر در ذخیره را به دلیل رفتار مولتی فرکتالی آن مشاهده نمود (شکل ۷ ب). بر این اساس حد آستانه‌ای عنصر نقره در منطقه برابر ۱/۹ ppm می‌باشد. و کمتر از این میزان نقره در محدوده زمینه بوده و دارای مرحله غنی شدگی ضعیف در منطقه می‌باشد و بیشتر از آن در مقادیر ۲۱ ppm > مرحله غنی‌سازی مناسب می‌باشد. در نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر سرب ۲ نقطه

شکست شاخص و ۳ مرحله غنی شدگی این عنصر را به رفتار مولتی فرکتالی آن نسبت داده می‌شود (شکل ۷ پ). بر این اساس حد آستانه‌ای عنصر سرب در منطقه برابر ۵۶/۲ ppm می‌باشد، و کمتر از این میزان سرب در محدوده زمینه بوده و دارای مرحله غنی‌سازی ضعیف در منطقه می‌باشد و بیشتر از آن در مقادیر ۹۷/۸ ppm $\geq$ دارای مرحله غنی‌سازی مناسب می‌باشد. در نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر طلا ۱ نقطه شکست شاخص و ۲ مرحله غنی‌شدگی این عنصر در کانسار را به دلیل رفتار مونو فرکتالی آن نسبت می‌دهیم (شکل ۷ ت). بقیه عناصر شامل Au، As و Cd در نمودار عیار - مساحت یک نقطه شکست شاخص و دو مرحله غنی‌شدگی به دلیل رفتار مونوفرکتال را در معرض نمایش قرار می‌دهند. حد آستانه‌ای آن‌ها به ترتیب ۱۰/۵ ppm، ۵۶ و ۵۶۱ بدست می‌آید از این رو غنی‌سازی این عناصر ضعیف و پراکنده بوده و هیچ‌گونه آنومالی از آن‌ها در منطقه به خاطر خاصیت مونو فرکتالی قابل مشاهده نیست (اشکال ۷ ت، ث و ج).

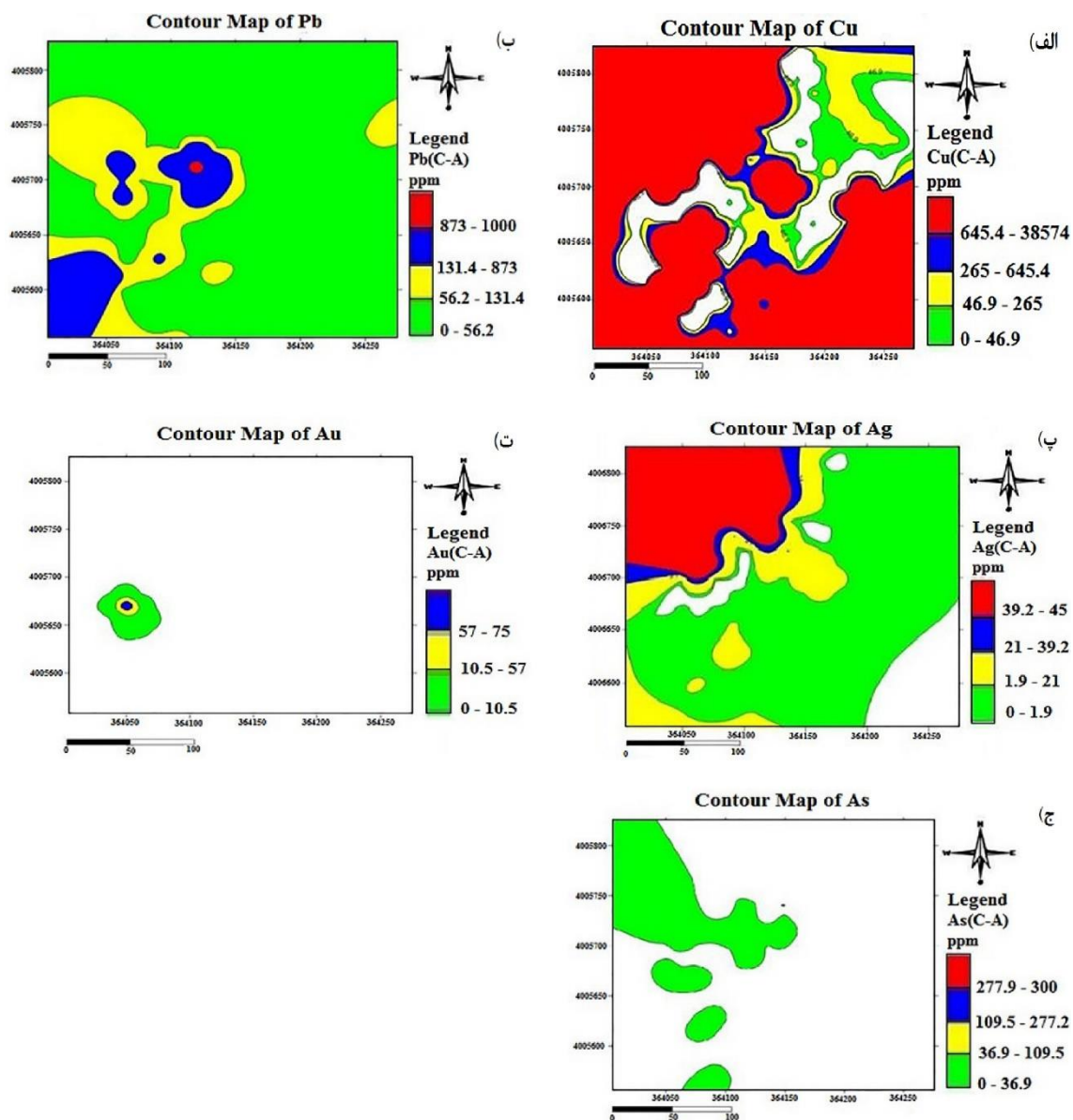
ترسیم نقشه‌های آنومالی عناصر برای روش‌های ساختاری: جهت آشکار نمودن الگوی پراکنش ژئوشیمیایی و تعیین آنومالی احتمالی عناصر مورد مطالعه به روش ساختاری بعد از تعیین زمینه، حد آستانه‌ای و آنومالی با درجات مختلف از روی از نمودار عیار - مساحت فرکتالی نقشه‌های آنومالی عنصری تهیه شد (شکل ۸).



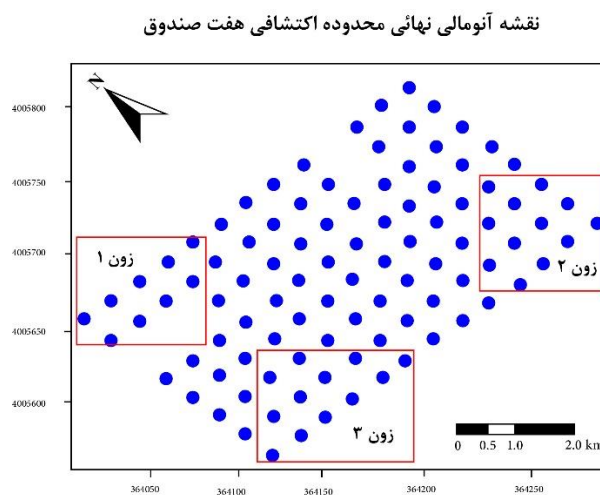
شکل ۷: نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر مختلف برای تخمین حد آستانه و حد آنومالی در منطقه هفت صندوق.

تعیین آنومالی عناصر

نقشه‌های آنومالی ترسیم شده بر مبنای روش فرکتالی عیار - مساحت (شکل ۷) نشان می‌دهد که عناصر Cu، Pb، Ag، Au و As دارای آنومالی‌های پراکنده در سطح منطقه بوده و کانی‌سازی‌های مرتبط متعلق به سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی - بازالتی ائوسن میانی و توف‌های آندزیتی - داسیتی ائوسن می‌توانند در نظر گرفته شوند. آنومالی عنصر مس عمدتاً در بخش‌های شمال غربی، جنوب شرقی و جنوب غربی و تا حدودی در مرکز منطقه به صورت آنومالی درجه ۲ دیده می‌شود (شکل ۸ الف). آنومالی Pb با درجه ۳ محدوده کوچکی در بخش مرکزی و جنوب غربی گستره منطقه را بخود اختصاص داده است (شکل ۸ ب). آنومالی Ag در بخش‌های شمال غربی منطقه به صورت آنومالی درجه ۲ قابل مشاهده است (شکل ۸ ب). در مورد عناصر Au، As و Cd بدلیل غلظت‌های نزدیک حد آستانه‌ای نقشه‌های کنترلی عیار آن‌ها در سطح منطقه قابل ترسیم نبوده و بدون آنومالی قابل ذکر معرفی می‌شوند (اشکال ۸ ت و ث). بنابراین از نظر توزیع مکانی آنومالی‌های عنصری، می‌توان محدوده مطالعاتی را به سه زون تقسیم‌بندی نمود: زون ۱ که بخش‌های شمال غرب محدوده را پوشش می‌دهد شامل آنومالی عناصر Cu و Ag با درجه دو می‌باشد. زون ۲ واقع در بخش جنوب شرقی محدوده صرفاً دارای آنومالی Cu با درجه دو بوده و زون ۳ که بطور غالب در جنوب غرب محدوده قرار دارد دربرگیرنده آنومالی عنصر Cu با درجه دو و Pb با درجه سه می‌باشد (شکل ۹). براساس شواهد کنترل‌های صحرایی می‌توان دریافت که کانی - سازی سولفیدی سرب - روی و مس در هفت صندوق تحت کنترل عوامل ساختاری و شکستگی‌های با روند غالب NE-SE در سنگ میزبان با ترکیب غالب آندزیت - بازالت ائوسن رخ داده است. رخداد آنومالی برجسته زون ۱ در شمال غرب محدوده می‌تواند به تغییر ترکیب سنگ‌شناسی از واحدهای آندزیتی به آهکی نسبت داده شود چرا که به‌عنوان سد ژئوشیمیایی می‌تواند نقش موثری در افزایش pH و ناپایداری کمپلکس‌های حمل کننده فلزات Cu، Ag و Pb در سیالات گرمابی کانه‌دار باشد.



شکل ۸: نقشه‌های آنومالی عناصر Cu، Pb، Ag، Au، Cd و As مستخرج از روش‌های تحلیل ساختاری.



Legend

- Rock sample
- Zone 1 (Cu, Ag)
- Anomaly Zone 2 (Cu)
- Zone 3 (Cu, Pb)

شکل ۹: نقشه نهایی آنومالی عناصر Cu، Ag و Pb بر روی شبکه نمونه برداری منطقه هفت صندوق. زون ۱ (Cu و Ag)؛ زون ۲ (Cu)؛ و زون ۳ (Cu و Pb).

بحث و نتیجه گیری

تحلیل ژئوشیمیایی سنگی انجام گرفته بر روی ۶ عنصر انتخابی Cu، Pb، Ag، Au، Cd و As با روش های غیرساختاری و ساختاری نشان می دهد که طبق نتایج حاصل از روش های غیر ساختاری هر ۶ عنصر آنومالی دارند در حالی که در روش های ساختاری ۳ عنصر Cu، Pb و Ag از بین عناصر نامبرده در منطقه آنومالی نشان می دهند. بنابراین به عنوان آنومالی های عنصری برجسته در منطقه هفت صندوق معرفی می شوند. از طرفی آنومالی عناصر دیگر که با روش غیر ساختاری مشخص شده اند به عنوان آنومالی کاذب در نظر گرفته می شوند. ماحصل این تحقیق نشانگر توانمندی روش های ساختاری فرکتالی به خصوص مدل سازی های مولتی فرکتالی در تعیین حد آستانه ای دقیق و کاهش مساحت آنومالی ها و نیز تعیین تعداد مراحل غنی شدگی عناصر در محدوده مورد مطالعه نسبت به روش های غیر ساختاری می باشد. امتیاز روش فرکتال شناسایی آنومالی های قابل توجه با مساحت کوچکتر براساس ساختار فضایی یافته هاست (جعفری، ۱۳۸۸). با آشکارسازی آنومالی های ضعیف و ماسک شده ریسک اکتشافی به مراتب پایین تر، و دقت و صحت بالاتر خواهد بود. در ادامه نقشه زمین شناسی منطقه با نقشه های محدوده آنومالی های به دست آمده از عناصر مس، نقره و سرب تطبیق داده و محدوده آنومالی ها تدقیق شدند. طبق روش فرکتالی log-log C-A برای عنصر مس ۴ مرحله غنی شدگی و عناصر نقره و سرب ۳ مرحله غنی شدگی تشخیص داده شد. طبق نتایج حاصله افزایش بعد فرکتالی در عناصر مس، نقره و سرب نشان دهنده وجود آنومالی این عناصر در منطقه است. نهایتاً در شمال غرب محدوده (زون ۱) آنومالی عناصر Cu و Ag با درجه دو، در جنوب شرقی محدوده (زون ۲) صرفاً آنومالی Cu با درجه دو و در جنوب غرب (زون ۳) آنومالی Cu با درجه دو و Pb با درجه سه تعیین شد.

منابع

- آقا نباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- ترکمانی، ا.، ۱۳۷۹. بررسی توده نفوذی شمال خرم دره، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.
- جعفری، ح. ر. و ضیاء‌ظریفی، ا.، ۱۳۸۸. مقایسه روش‌های آمار کلاسیک و هندسه فرکتالی در جدایش جوامع ناهنجاری عناصر اورانیوم و توریوم منطقه ده سیاهان (استان کرمان)، تحقیق در عملیات و کاربردهای آن (ریاضیات کاربردی)، ص ۶۱-۶۹.
- حسنی پاک، ع. ا. و شرف‌الدین، م. و.، ۱۳۸۰. تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۲ ص.
- حسنی پاک، ع. ا.، ۱۳۹۱. اصول اکتشافات ژئوشیمیایی، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۱۵ ص.
- حیدری، ط.، مجتهدزاده، س. ح. و قربانی، ا.، ۱۳۹۳. جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی اندیس مس ظفرقند با استفاده از روش فرکتالی عیار- مساحت و مقایسه با روش آمار کلاسیک، پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه یزد.
- خواجه میری، ز.، شایسته فر، م. ر. و معین زاده، ح. ا.، ۱۳۹۲. پردازش داده‌های ژئوشیمیایی و تعیین مناطق آنومال با استفاده از روش تجزیه عامل‌ها، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- علیجانی، ل.، ۱۳۹۴. بررسی زمین‌شناسی اقتصادی و ژنز ذخیره پلی متال چنگوره با تاکید بر سرب، شمال- غرب تاکستان استان قزوین، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تبریز.
- فیضی، ف. و خاکزاد، ا.، ۱۳۷۶. ژنز کانسار مس خلیفه لو، اولین همایش سالانه انجمن زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ ص.

- Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A. and Good, D., 1996. Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba, computer and geotechnics, v. 22 (5), p. 497-507
- Ali, K., Cheng, Q. and Chen, Z., 2007. Multifractal power spectrum and singularity analysis for modelling stream sediment geochemical distribution patterns to identify anomalies related to gold mineralization in Yunnan Province, South China, Geochemistry Exploration Environment Analysis, v.7, p. 293-301.
- Cheng, Q., Agterberg, F. P. and Ballantyne, S. B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods, Journal of Geochemical Exploration, v. 51, p. 109-130.
- Chork, C.Y., 1991. An assessment of last median of squates regression in exploration geochemistry, Geochemical exploration, p. 325-340.
- Clark, I., 1987. Practical geostatistics, Elsevier Applied Science Publishers Ltd.
- Goncalves, M.A., 2001. Characterization of geochemical distributions using multifractal Mathematical Modeling Geology, v. 33 (1), p. 41-61

- Heidari, S.M., Ghaderi, M. and Afzal, P., 2013. Delineating mineralized phases based on lithogeochemical data using multifractal model in Touzlar epithermal Au-Ag(Cu) deposit, NW Iran, *Applied Geochemistry*, v.31, p. 119-132.
- Moon, C.J., Whateley, M.K.G. and Evans, A.M., 2006. *Introduction to Mineral Exploration*, Blackwell, Oxford, 481p.
- Robert, R.G. and Grunsky, E.C., 2001. Weighted sums-Knowledge based empirical indices for use in exploration geochemistry, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Geological Society of London, v. 1, p. 135-141.
- Sami, H. and Abd, N., 2001. Evaluation of airborne gamma ray spectrometric data for the Missikat Uranium deposit, Eastern desert Egypt, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 54 p. 497-507.
- Sim, B.L., Agterberg, F.P. and Beaudry, C., 1999. Determining the cutoff between background and relative base metal contamination levels using multifractal methods, *computer science*, v. 25, p. 1023–1041.
- Turcotte, D.L., 1997. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, p.?
- Wang, G., Carranza, E.M.J., Zuo, R., Hao, Y., Du, Y., Pang, Z., Sun, Y. and Qu, J., 2012. Mapping of district-scale potential targets using fractal models *Journal of Geochemical Exploration*, v.122, p.34–46.
- Wellmer, F.W., 1997. *Statistical evaluations in exploration for mineral deposits*, Springer- Verlag, New York, 379 p.
- Zuo, R., Cheng, Q. and Xia, Q., 2009. Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration, *Journal of Geochemical Exploration*. v.102, p.37–43.