

## جدایش آنومالی زمین‌شیمیایی از زمینه به روش فرکتال عیار - مساحت (منطقه انگوران، شمال غربی ایران)

### اباصلت فیضی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، تهران، ایران.

### اردشیر هزارخانی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۸/۱

afeizi@aut.ac.ir

### چکیده

منطقه انگوران در بخش باختری پهنه البرز - آذربایجان و در ۱۳۰ کیلومتری جنوب‌باختری زنجان واقع است. در این مقاله، به منظور جدایش آنومالی ژئوشیمیایی از زمینه، روش فرکتال عیار - مساحت به کار گرفته شده است. بررسی‌های ژئوشیمیایی ۲۵۸ نمونه رسوب آبراهه‌ای با استفاده از روش مذکور در منطقه انگوران، منجر به تفکیک مناطق آنومال سرب و روی در بخش شمال شرقی منطقه گردید که با آنومالی حاصل از عنصر آرسنیک هم‌پوشانی دارند. با تطبیق این مناطق آنومال با داده‌ها و مشاهدات زمین‌شناسی، مشخص گردید که «مرز شیست با آهک» به‌عنوان منطقه آنومال بوده و می‌تواند راهنمای اکتشافی سرب و روی در این منطقه محسوب شود. همچنین مشخص شد که دو فاز کانی‌سازی مربوط به سرب و روی در منطقه انگوران وجود دارند که این نتیجه، احتمالاً می‌تواند منطبق بر مشاهدات زمین‌شناسی مبنی بر اکسیدی - سولفیدی بودن کانی‌های سرب و روی در منطقه انگوران باشد.

**کلمات کلیدی:** فرکتال؛ زمین آمار؛ آنومالی؛ سرب؛ انگوران

### مقدمه

امروزه جدایش آنومالی از زمینه و جداسازی آنومالی‌های با درجات شدت گوناگون، مهمترین کار در مطالعات ژئوشیمیایی است. روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال با توجه به خصوصیات چون استفاده از تمام داده‌ها، در نظر گرفتن شکل - هندسی در برگیرنده عیارهای گوناگون و توجه به نوع توزیع داده‌ها از بهترین روش‌ها در جدایش آنومالی ژئوشیمیایی از زمینه می‌باشد (Cheng, et al., 1994). نتایج حاصل از روش‌های سنتی مبتنی بر آمار کلاسیک تا مدت‌ها به عنوان تنها روش‌های تحلیل داده‌ها مورداستفاده قرار می‌گرفت که دارای نقایصی از قبیل شرط تبعیت از توزیع نرمال، حذف تعدادی از داده‌ها به‌عنوان خارج از ردیف، عدم توجه به توزیع فضایی داده‌ها و نیز عدم توجه به شکل هندسی آنومالی‌ها می‌باشد (Davis, 2002). روش فرکتال عیار - مساحت در اکتشافات ژئوشیمیایی برای جدایش جوامع آنومال از زمینه، نخستین‌بار توسط (Cheng, et al., 1994) براساس رفتار فرکتالی توزیع‌های ژئوشیمیایی در طبیعت ارائه شده است. نمودار لگاریتمی عیار در برابر مساحت تجمعی در نقاطی می‌شکند یا به عبارتی تغییر شیب تند می‌دهد که این نقاط نمایانگر تغییر از زمینه به آنومالی‌های درجات مختلف و به‌تبع آن تغییرات در شرایط زمین‌شناسی به خصوص کانی‌سازی است (Agterberg, et al., 1996). به‌طور کلی داده‌های ژئوشیمیایی رفتار مولتی فرکتال یا چندفرکتالی دارند که این نشانگر میزان تغییرات در شرایط زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دگرسانی، هوازدگی سطحی، کانی‌سازی و به‌دنبال آن مراحل غنی‌شدگی یک‌عنصر است (Goncalves, et al., 2001). لذا، در انتخاب روشی معین از میان روش‌های مختلف موجود جهت تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی، باید به این نکته توجه نمود که هیچ‌یک از روش‌های موجود جهت تعیین و شناسایی آنومالی‌ها، مستقل از دانش زمین‌شناسی نبوده و جهت هر گونه تفسیری از نتایج بدست آمده، بایستی آنها را با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه

منطبق نمود. روش فرکتال عیار - مساحت مبتنی بر میزان مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه مورد مطالعه اشغال نموده است. هر چه عیار عنصر افزایش یابد، میزان مساحت اشغالی توسط آن کاهش می‌یابد. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای نمایش توزیع عیار یک‌عنصر در یک منطقه ترسیم نقشه‌کنتری (منحنی - میزان) هم‌عیار عنصر مربوطه در منطقه مورد مطالعه است. اگر مقدار هرکنتور عیاری برابر با  $v$  در نظر گرفته شود، می‌توان یک معادله‌توانی بصورت زیر برای تمرکز مواد با خواص فرکتال ارائه نمود (Cheng, et al., 1994; Carranza, 2009).

$$A(\geq v) \propto v^{-\alpha}$$

$A(\geq v)$  مساحت تجمعی محصورشده توسط خطوط هم‌عیاری است که عیارمتناظر آنها بزرگتر یا مساوی  $v$  است. مقدار  $\alpha$  نیز در حقیقت نمایانگر بُعد فرکتال مربوطه دامنه‌های متفاوت  $v$  می‌باشد. با ترسیم تغییرات مساحت در برابر عیار در نموداری لگاریتمی می‌توان بُعد هر جامعه را از طریق شیب خط برازش شده به آن حساب نمود. نقاط شکست (تغییر شیب خط برازش شده) در این نمودار بیانگر تغییر یک - جامعه به جامعه دیگر است، به‌گونه‌ای که علاوه بر جداکردن زمینه، می‌توان آنومالی‌های با درجات شدت مختلف یک‌عنصر و حتی در برخی موارد کانی‌سازی - های اصلی و فرعی مربوط به آن‌عنصر را از یکدیگر جدا نمود (Li, et al., 2003). تغییر از جامعه‌ای به جامعه‌ای دیگر نشان‌دهنده شرایط زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی است. این توانایی منحصربه‌فرد به‌خاطر ماهیت فرکتالی توزیع عناصر در طبیعت است. این مسأله سبب می‌شود که نیازی به حذف مقادیر خارج از ردیف نباشد زیرا به‌دلیل ماهیت فرکتالی داده‌ها به‌طور خودکار این داده‌ها خنثی می‌شوند (Agterberg, et al., 1996; Goncalves, et al., 2001). محدوده ۲۰۰۰ کیلومتر مربعی اطراف معدن انگوران از پتانسیل معدنی بسیار بالایی برخوردار است و آثار کانی‌سازی رگه‌های سرب، روی و مس در بخش

### نمونه برداری و آنالیز نمونه‌ها

اکتشافات ژئوشیمیایی در منطقه انگوران، شامل برداشت ۲۵۸ نمونه رسوب-آبراهه‌ای است که از جزء ۸۰- مش‌خاک برداشت شد و پس از آماده‌سازی اولیه، برای آنالیز به آزمایشگاه SGS کانادا ارسال گردید. نمونه‌ها با استفاده از روش ICP-MS برای ۳۵ عنصر و روش Fire Assay برای عنصر طلا مورد آنالیز قرار گرفت (جدول ۱).

### شناخت و جدایش جوامع سنگی

در محیط GIS با استفاده از نقشه زمین‌شناسی، توپوگرافی، آبراهه‌ها و موقعیت نمونه‌ها، انواع سنگ بالادست هر نمونه مشخص گردید. در این حالت با مشخص کردن حوضه آبریز هر نمونه، تمامی واحدهای سنگی که رسوبات حاصل از فرسایش آنها، سهمی در تشکیل نمونه داشته اند، شناسایی شدند (جدول ۲). سپس تعداد نمونه‌های هر زیرجامعه یک‌سنگی، دوسنگی و بیش از دوسنگ و نیز سهم هر یک در جامعه کل نمونه‌ها تفکیک شدند. در زیرجامعه تک‌سنگی بیشترین نمونه‌ها مربوط به جامعه سنگ‌آهک و در دوسنگی مربوط به جامعه آمفیبولیت-کلریت سیست با میان لایه‌های آهک توده‌ای تا ضخیم لایه است. بدیهی است هرچه بر تعداد نمونه‌های زیرجامعه تک‌سنگی افزوده شود و از تنوع گونه‌های سنگ بالادست کاسته گردد، محیط همگن‌تری از نظر منشأ رسوبات آبراهه‌ای در منطقه وجود خواهد داشت و از شدت تأثیر این عامل بر غیرنرمال شدن جامعه نمونه‌های ژئوشیمیایی کاسته می‌شود.

### بررسی زمینه محلی در هر یک از جوامع سنگی و مقایسه آنها با

#### جامعه کلی

بررسی جدول کلارک عناصر مختلف در سنگ‌های گوناگون نشان می‌دهد که توزیع عناصر کانی‌ساز در واحدهای سنگی مختلف متفاوت است. به‌عنوان مثال زمینه عنصر نیکل در سنگ‌های اولترابازیک حدود ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام است، در حالی که در سنگ‌های گرانیتی ۴/۵ پی‌پی‌ام غلظت دارد. لذا اگر جامعه نمونه‌های ژئوشیمیایی برداشت شده از این دو محیط با هم تشکیل یک جامعه را بدهند اکثر نمونه‌های به‌ظاهر آنومال را نمونه‌های برداشت شده از مناطق تحت پوشش سنگ‌های اولترابازیک تشکیل خواهند داد. درحالی‌که ممکن است غلظت نیکل در این نمونه‌ها در حدهای سنگ‌های اولترابازیک باشد و از لحاظ کانی‌سازی اهمیتی نداشته باشد (درفاز سیلیکاتی باشد). (جدول ۳) مقدار فراوانی عناصر را در تیپ‌های سنگی آذرین و رسوبی با گسترش نسبتاً زیاد را نشان می‌دهد.

بیشترین حساسیت از آن مس با ضریب ۸۷ (ماکزیمم مقدار آن در سنگ‌های بازیک و حداقل آن در سنگ‌های آهکی است) سپس نیکل ۶۵ و آرسنیک ۱۳ می‌باشد. این ارقام نشان می‌دهد که مقدار یک عنصر در حوضه آبریز تا جایی که به لیتولوژی حوضه آبریز مربوط می‌شود، به‌شدت تغییرپذیر بوده و بدون نرمالیز کردن مقدار عنصر نسبت به جنس سنگ‌های بالادست در حوضه آبریز امکان دستیابی به یک جامعه همگن که بتوان براساس آن مقدار زمینه، حد آستانه‌ای و آنومالی‌ها را در آن مشخص کرد غیرممکن می‌باشد. لازم به یادآوری است که مقدار زمینه یک‌سنگ از یک ناحیه به ناحیه دیگر ممکن است تغییر کند. در اکتشافات ناحیه‌ای مناسب‌تر آن است که به جای کلارک جهانی از مقدار زمینه ناحیه‌ای بهره‌جست. این مقدار را می‌توان معادل میانه جامعه در نظر گرفت (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴).

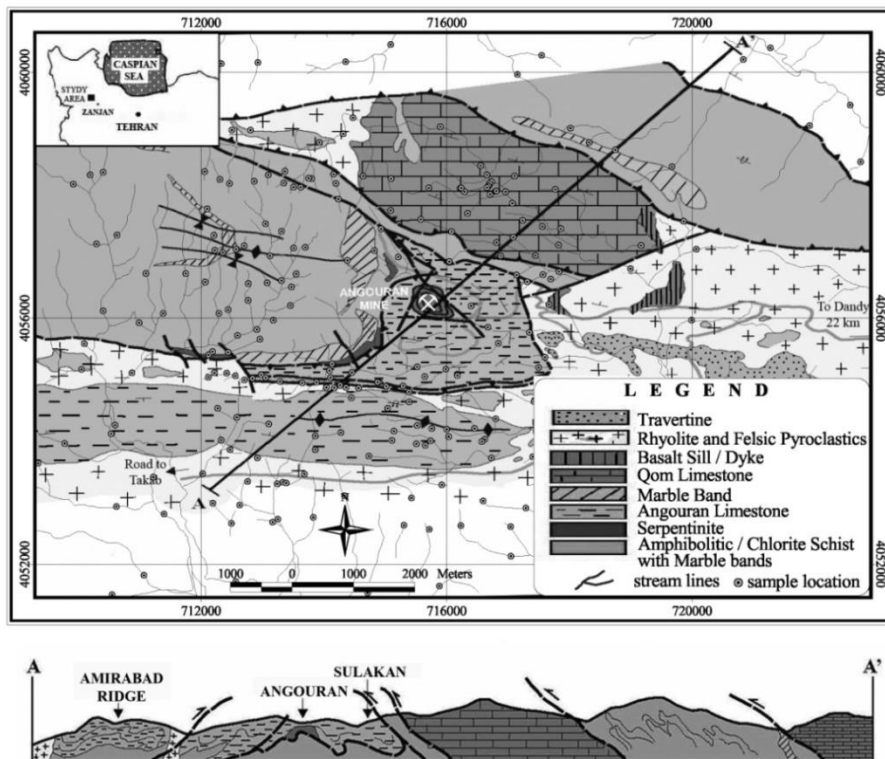
های میانی و شمالی آن به چشم می‌خورد. کانسار سرب و روی انگوران موجب شده است که این منطقه و نواحی اطراف آن به‌عنوان خاستگاه صنعت و قطب سرب و روی ایران مطرح شود و همواره مورد مطالعه قرارگیرد (شکورزاده و رهبر، ۱۳۸۵). اولین مطالعات اکتشافی در تاریخچه فعالیت‌های اکتشافی منطقه انگوران توسط سازمان زمین‌شناسی ژاپن در سال ۱۹۶۸ توسط آقای هیرایاما انجام گرفته است که نتیجه آن تحت‌عنوان «مطالعات زمین‌شناسی معدن انگوران، گزارش شماره ۲۲۶، سازمان زمین‌شناسی ژاپن، ۱۹۶۸» ثبت شده است (Pride, et al., 2004).

طی سالهای ۱۹۶۶ تا ۱۹۶۸ سازمان زمین‌شناسی ایران، عملیات صحرایی و برداشت‌های زمین‌شناسی مربوط به تهیه نقشه زمین‌شناسی چهارگوش تکاب-شاهین‌دژ در مقیاس ۱:۲۵۰/۰۰۰ را انجام داده است که نقشه مذکور، بعد از ده سال، در سال ۱۹۷۶ آماده چاپ شد. گزارش شماره ۵۰ سازمان زمین‌شناسی ایران، از سال ۱۹۸۲ به همراه نقشه مذکور (در پشت آن) چاپ و منتشر می‌شود (Pride, et al., 2004). چهارگوش تکاب-شاهین‌دژ شامل شش برکه به مقیاس ۱:۱۰۰/۰۰۰ است که هر یک دارای ۳۰ ثانیه طول جغرافیایی (۴۵ کیلومتر) و ۳۰ ثانیه عرض جغرافیایی (۵۵/۳ کیلومتر) هستند یعنی هر برکه مساحت تقریبی در حدود ۲۴۹۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. برکه تخت‌سلیمان یکی از آنهاست که منطقه انگوران در آن واقع شده است (Pride, et al., 2004). در این مقاله، برای اولین بار، روش فرکتال عیار-مساحت برای تشخیص زون‌های کانی‌سازی در منطقه انگوران به کار رفته است.

### زمین‌شناسی منطقه انگوران

منطقه مورد مطالعه از نظر ساختمانی در محل برخورد زون البرز-آذربایجان، زون ایران مرکزی و زون سندج-سیرجان واقع بوده و از آنرو دارای ویژگی‌های زون‌های یاد شده نیز می‌باشد (باباخانی و قلمقاش، ۱۳۸۰؛ شکورزاده و رهبر، ۱۳۸۵). مهمترین واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه، براساس باباخانی و همکاران، ۱۳۸۱، عبارتند از: سنگ‌آهک منسوب به سازند قم که قسمت اعظم بخش شمالی منطقه را تشکیل داده است. در بخش جنوبی آن، سنگ‌های دگرگون بادرجه‌دگرگونی کم تا متوسط شامل آمفیبولیت-سپانیت‌سیست، از شمال باختری تا مرکز کشیده شده شده‌اند. شمال آهک‌قم را نیز یک رخنمون دگرگون دیگر شامل گنایس فلدسپات‌دار به خود اختصاص داده است که تا شمال خاوری امتداد دارد. رخنمون‌های نوار مرمر معمولاً در لابلای سنگ‌های دگرگون پراکنده‌اند.

یک رخنمون سنگ‌آهک توده‌ای تا ضخیم لایه منسوب به آهک‌انگوران هم از مرکز به سمت باختر امتداد یافته است. در نیمه پایینی منطقه، سنگ‌های آذرین-روشن شامل آندزیت-داسیت دیده می‌شود. چند رخنمون پراکنده بازالت و یک-رخنمون تراورتن نیز در بخش خاوری منطقه جای دارند. امتداد گسل‌های غالب منطقه نیز شمال‌باختری-جنوب‌خاوری است (شکل ۱). در منطقه مذکور، کانی‌سازی عناصر سرب، روی، مس، منگنز و آرسنیک به‌وضوح قابل مشاهده‌اند. رخنمون‌های گالن و زرنیخ در نیمه شمالی منطقه، به‌خصوص در آثار معدنکاری قدیمی و داخل ترانشه‌های قدیمی واقع در شمال‌خاوری وجود دارد. در جنوب-باختری، رگه‌های حاوی کالکوپیریت، پیریت، مالاکیت دیده می‌شوند. در بخش-های آهکی منطقه نیز، آنکریت‌های حاوی رگه‌های منگنز دندریتی فراوان‌اند.



شکل ۱. موقعیت نمونه‌های برداشت شده، زمین‌شناسی و مقطع عرضی A-A' منطقه انگوران (بر اساس باباخانی، ع. ر. و همکاران، ۱۳۸۱ با اندکی تغییرات).

جدول ۱. نتایج آنالیز نمونه‌های شماره ۲۱۱ تا ۲۵۰ برای عناصر سرب، روی، مس، نیکل، منگنز، آرسنیک و طلا.

Au	As	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb	عنصر
FA301	ICP80	ICP80	ICP80	ICP80	ICP80	ICP80	روش آنالیز
ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	واحد
۱	۳	۲	۱	۰/۵	۰/۵	۲	حدهساسیت دستگاهی
							شماره نمونه □
۶	۱۰۷	۷۷۷	۱۴	۱۴/۵	۲۸۵	۱۶۷۰	۲۱۱
۱۳	۹	۸۰۹	۱۴	۱۰/۸	۹۰	۸۴	۲۱۲
۶	۵	۷۳۶	۱۶	۱۱/۳	۶۵	۷۹	۲۱۳
۰/۵	۱/۵	۲۴۸	۱۴	۱۴/۳	۳۰	۱۷	۲۱۴
۰/۵	۱۷	۸۶۳	۲۸	۳۰/۷	۵۲	۲۵	۲۱۵
۱۲	۷۱	۲۷۵۰	۳۸	۱۴۹/۰	۳۰۸	۱۲۲	۲۱۶
۲۰	۱۷	۷۶۷	۴۲	۳۱/۷	۸۱	۲۳	۲۱۷
۴	۱/۵	۴۳۶	۱۹	۱۹/۹	۴۶	۱۹	۲۱۸
۶	۱۰	۱۱۳۰	۵	۱۸/۳	۳۹	۱۴	۲۱۹
۱۶	۲۳	۶۷۸	۳۱	۲۵/۸	۸۴	۳۷	۲۲۰
۲۰	۱۹	۷۳۰	۳۰	۳۵/۷	۸۳	۳۱	۲۲۱
۲۳	۵۸	۹۸۳	۱۹	۲۷/۹	۱۶۵	۳۷	۲۲۲
۲	۱۰۷	۱۸۹۰	۱۹	۲۴/۴	۱۰۸	۱۹	۲۲۳
۲	۱۸	۷۷۰	۱۲	۱۳/۲	۸۶	۲۰	۲۲۴
۱۲	۱۱	۱۲۶۰	۱۶	۱۵/۲	۱۷۹	۳۶	۲۲۵
۹	۳۱	۷۲۲	۶۰	۸۲/۱	۲۵۳	۷۱	۲۲۶
۵	۱۳	۸۰۷	۲۵	۲۴/۹	۲۱۴	۳۸	۲۲۷
۱۱	۱۲	۱۲۲۰	۱۳	۱۶/۹	۱۲۷	۲۰	۲۲۸

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز نمونه‌های شماره ۲۱۱ تا ۲۵۰ برای عناصر سرب، روی، مس، نیکل، منگنز، آرسنیک و طلا.

۸	۸	۶۵۹	۱۲	۲۲/۵	۱۰۶	۱۸	۲۲۹
۲۱	۱۷	۵۷۴	۱۱	۱۰/۳	۱۰۳	۳۴	۲۳۰
۰/۵	۱۴	۵۱۰	۱۱	۹/۵	۵۰	۱۶	۲۳۱
۰/۵	۸۵	۸۷۸	۳۹	۲۷/۳	۱۸۱	۴۸	۲۳۲
۴	۱/۵	۱۱۱۰	۲۶۹	۷۰/۲	۹۶	۴۱	۲۳۳
۴	۱/۵	۱۳۹۰	۳۵۴	۷۴/۸	۱۰۳	۲۰	۲۳۴
۲	۱/۵	۱۳۳۰	۴۸۰	۷۰/۳	۹۶	۳۵	۲۳۵
۹	۴	۹۵۴	۸۱	۴۷/۶	۷۶	۶۵	۲۳۶
۱۶	۱/۵	۱۰۲۰	۱۱۶	۵۳/۸	۸۸	۷۸	۲۳۷
۷	۴	۱۱۷۰	۱۹۰	۷۴/۷	۱۰۲	۵۱	۲۳۸
۳	۲۶	۸۵۹	۶۴	۳۱/۹	۹۳	۶۱	۲۳۹
۲۲	۸	۹۲۷	۹۷	۴۸/۴	۸۸	۸۴	۲۴۰
۱۳	۳۲	۱۸۷۰	۴۶	۳۹/۱	۲۵۸	۵۴	۲۴۱
۱۱	۲۵	۱۱۰۰	۴۴	۴۵/۲	۲۴۶	۱۳۶	۲۴۲
۲۳	۴۳	۳۵۰۰	۴۶	۳۰/۰	۲۱۷	۴۱	۲۴۳
۱۹	۲۱	۱۰۰۰	۳۷	۳۷/۱	۱۹۵	۸۵	۲۴۴
۱۳	۸	۱۲۱۰	۵۶	۷۴/۱	۷۸	۲۱	۲۴۵
۰/۵	۱۷	۱۵۳۰	۵۳	۹۱/۲	۱۰۵	۲۳	۲۴۶
۰/۵	۱۹	۱۰۱۰	۳۷	۲۵/۱	۸۶	۱۵	۲۴۷
۰/۵	۶۳	۱۴۳۰	۶۳	۷۰/۶	۱۷۰	۷۵	۲۴۸
۰/۵	۲۳	۱۱۶۰	۱۶	۱۳/۲	۱۰۳	۱۴	۲۴۹
	۱/۵	۸۵۳	۵۰	۲۲/۱	۵۸	۲۰	۲۵۰

جدول ۲. علائم اختصاری به کاررفته مربوط به جوامع سنگی مختلف.

علامت اختصاری	ترکیب سنگ بالادست
Ser	سرپانتینیت
Sch	آمفیبولیت-کلریت شایست
Lst	سنگ آهک
Mbl	میان لایه های آهک توده ای تا ضخیم لایه
An	آندزیت- داسیت- ریولیت
Dyk	دایک های دیابازی و اسیدی
Tuf	توف
Tra	تراورتن

جدول ۳. مقادیر کلارک و نسبت Max/Min مقادیر کلارک برای عناصر منتخب.

Max/Min	سنگ‌های آذرین			سنگ‌های رسوبی			عنصر
	اسیدی	حدواسط	بازی	LM	SH	CS	
۳/۳	۱۹	۱۲	۶	۹	۲۰	۷	سرب
۶/۶	۳۹	۷۵	۱۰۵	۲۰	۹۵	۱۶	روی
۸۷	۱۰	۴۰	۸۷	۴	۴۵	۱	مس
۶۵	۴/۵	۵۰	۱۳۰	۲	۶/۸	۲	نیکل
۳	۴۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۴۰۰	۸۰۰	۴۰۰	منگنز
۱۳	۱/۵	۲	۲	۱	۱۳	۱	آرسنیک
۴/۵	۰/۸	۲/۸	۳/۶	-	-	-	طلا

عنصر طلا با عناصر سرب و روی دارای همبستگی منفی است لذا با کاهش طلا در این منطقه، مقادیر سرب و روی افزایش می‌یابد.

#### تخمین مقادیر زمینه، حدآستانه و آنومالی به روش آمار کلاسیک

در این مرحله پارامترهای آماری عناصر سرب، روی، مس، نیکل، منگنز، آرسنیک و طلا با کمک آمار کلاسیک محاسبه شده‌اند که نتیجه آن در (جدول ۵) آورده شده است. سپس با ترسیم هیستوگرام هر یک از این عناصر، توزیع این عناصر بررسی شده است. این بررسی نشان داد که تنها عنصر طلا دارای توزیع نزدیک به توزیع نرمال بوده و دیگر عناصر به دلیل وجود مقادیر خارج از ردیف دارای توزیع لاگ نرمال می‌باشند. بر این اساس می‌توان با آمار کلاسیک برای عنصر طلا حد زمینه «میانگین + انحراف معیار» و حد آستانه «میانگین + دو برابر انحراف معیار» را تعیین نمود (Cheng, et al., 1994; Carranza, 2009). برای عناصر دیگر حد زمینه «میانگین + انحراف معیار» و حد آستانه «میانگین + دو برابر انحراف معیار» و بالاتر از «میانگین + دو برابر انحراف معیار» به عنوان آنومالی در نظر گرفته می‌شود (مدنی، ۱۳۹۰).

#### روش فرکتال عیار - مساحت کاربرد GIS در روش فرکتال عیار - مساحت

نخستین کاری که در این مرحله صورت پذیرفت، شبکه بندی محدوده مورد مطالعه است. ابعاد شبکه بستگی به مقیاس برداشت‌ها، دقت مورد نیاز و امکانات سخت افزار (حافظه) دارد. از آنجا که فاصله بهینه شبکه بندی، برابر یک چهارم تا یک دوم متوسط نقاط نمونه برداری می‌باشد و در این تحقیق متوسط فاصله نقاط نمونه برداری ۴۸۷ متر است بنابراین، محدوده انگوران به ۸۲۰۰ سولول به ابعاد ۲۰ متر × ۱۲۰ متر تقسیم بندی گردید. سپس در نرم افزار ArcView GIS محدوده بالادست هر نمونه که مقدار عیار آن نمونه به آن ناحیه نسبت داده می‌شود، مشخص گردید. سپس بر اساس سولول واحد تعریف شده، به تخمین شبکه در سولول‌های مربوط به بالادست هر عیار پرداخته شد. جهت درون‌یابی عیارهای ژئوشیمیایی، مابین نقاط نمونه برداری شده جهت تهیه نقشه خطوط هم‌عیار، از روش مجذور عکس فاصله (Inverse distance) استفاده گردید.

#### خنثی‌سازی تغییرات لیتولوژی با استفاده از محاسبه شاخص غنی‌شدگی

پس از آن که بر اساس نوع سنگ بالادست جوامع آماری جدا شدند، در هر یک از جوامع، اثر لیتولوژی (اثر مؤلفه سین‌ژنتیک) حذف یا حداقل کاهش می‌یابد. معمولاً از مقدار میانگین یا میانه هر یک از عناصر در هر یک از جوامع به عنوان مقدار زمینه استفاده می‌شود. با تقسیم هر یک از داده‌ها بر مقدار زمینه، مقدار شاخص غنی‌شدگی به دست می‌آید:

$$E_i = \frac{C_i}{C_m}$$

در این رابطه  $E_i$  شاخص غنی‌شدگی،  $C_i$  غلظت عنصر مورد نظر در نمونه آم از جامعه مورد نظر و بالآخره  $C_m$  مقدار زمینه (میانگین یا میانه) مربوط به جامعه مورد نظر است. شاخص غنی‌شدگی تا حد زیادی مستقل از تغییرات لیتولوژی است. پس از محاسبه شاخص غنی‌شدگی برای جوامع مختلف، می‌توان آنها را با هم ادغام کرده و تحت یک جامعه آماری مورد بررسی قرارداد. از خواص دیگر شاخص غنی‌شدگی آن است که تا حدودی خطاهای تصادفی را کاهش می‌دهد (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴).

#### مطالعه همبستگی عناصر

محاسبه ضریب همبستگی بسته به نوع داده‌ها معمولاً به دو صورت انجام می‌شود. یکی از این روش‌ها روش پیرسون می‌باشد. در این روش فرض نرمال بودن داده‌ها الزاماً باید صادق باشد. در صورتی که توزیع داده‌ها نرمال نباشد یا باید از داده‌های تبدیل یافته و یا از روش‌های ناپارامتری استفاده کرد که یکی از این روش‌ها محاسبه «ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن» می‌باشد (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴). در (جدول ۴) ضرایب همبستگی بین عناصر به روش اسپیرمن محاسبه شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود نیکل و کروم «همبستگی بسیار قوی» دارند ( $r_s=0.838$ ). عنصر سرب با عنصر روی «همبستگی قوی» دارد ( $r_s=0.616$ ). لذا با افزایش میزان سرب، میزان روی در این منطقه افزایش می‌یابد.

زیر می باشد:

$$y = -3.50x + 16.76$$

X و Y به ترتیب معادل  $\log(\text{Pb})$  و  $\log A(\geq \text{Pb})$  می باشد لذا، معادله فوق به شکل زیر درآمد:

$$\log A(\geq \text{Pb}) = -3.50 \log(\text{Pb}) + 16.76$$

$$\log A(\geq \text{Pb}) = \log(\text{Pb}^{-3.50}) + \log 10^{16.76}$$

$$\log A(\geq \text{Pb}) = \log(10^{16.76} \times \text{Pb}^{-3.50})$$

برای ترسیم نمودار عیار- مساحت داده‌ها، لازم است تا ابتدا نتایج تخمین شبکه براساس عیار کلاسه‌بندی شوند (ترجیحاً از عیار بیشتر به عیار کمتر). بدین منظور رنج تغییرات عیار هر دسته، میانگین عیار آن و تعدادی از سلول‌ها که در این رنج عیار واقع می‌گردند در یک برآورد آماری از جامعه داده‌های موجود محاسبه شد و داده‌های لازم برای ترسیم نمودار لگاریتم عیار در برابر لگاریتم مساحت فراهم- گردید (Carranza, 2009).

### تعیین بُعد فرکتال در روش فرکتال عیار- مساحت

به منظور تعیین بُعد فرکتال برای هر جامعه، نمودار پراکنش (Scatter plot) مساحت‌های حوضه‌های آبریز هر نمونه بر حسب عیار متناظر آن در سیستم لگاریتمی ترسیم شد. براساس رابطه (۱)، یک رابطه توانی بین عیار و مساحت‌های حوضه‌های آبریز هر نمونه برقرار است. برای عنصر سرب، معادله ابتدایی خط برازش شده بر جامعه پرعیار که دارای عیار بیش از ۱۲۲۰۲ پی‌پی‌ام است به صورت

جدول ۴. ضریب همبستگی عناصر به‌روش ناپارامتری اسپیرمن ( $r_s$ )؛ تعداد کل نمونه‌ها ۲۵۴ عدد.

سرب	روی	مس	نیکل	منگنز	آرسنیک	طلا	کروم
سرب	۱						
روی	۰/۶۱۶	۱					
مس	۰/۱۲۱	۰/۳۶۱	۱				
نیکل	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۶۷۲	۱			
منگنز	۰/۰۰۹	۰/۴۰۲	۰/۴۹	۰/۲۴	۱		
آرسنیک	۰/۴۸۳	۰/۶۹۷	۰/۱۹۷	۰/۲۴۳	۰/۲۵۷	۱	
طلا	-۰/۱۳۳	-۰/۰۴۹	۰/۰۶۱	-۰/۱۶۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۱
کروم	۰/۱۸۲	۰/۱۴۱	۰/۵۵۷	۰/۸۳۸	۰/۲	-۰/۰۱۱	۱

جدول ۵. اطلاعات حاصل از آمار کلاسیک.

عنصر	سرب	روی	مس	نیکل	منگنز	آرسنیک	طلا
واحد	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
میان (Mean)	۹۴۴/۲	۶۳۸/۸۵	۴۲/۵۵	۱۰۳	۹۸۹/۹۵	۱۳۷/۹۹	۷/۹۲
میانگین (Median)	۴۴	۱۰۸	۳۵/۷۵	۵۱/۵	۹۲۴/۴	۲۳	۴
ماکزیم (Max)	۴۳۳۰	۲۴۲۹۰	۴۷۲	۱۶۳۰	۳۰۰۰	۴۴۷۰	۶۷
انحراف معیار (SD)	۵۰۷۸/۲۹	۲۸۲۴/۸۸	۳۷/۶۸	۱۶۱/۴۷	۴۵۱/۷۷	۵۳۹/۵۳	۹/۹۵
میانگین + انحراف معیار							۱۳/۹۵
میانگین + دو برابر انحراف معیار							۲۳/۹
میان + انحراف معیار	۶۰۲۲/۴۹	۳۴۶۳/۷۳	۸۰/۲۳	۲۶۴/۴۷	۱۴۴۱/۷۲	۶۷۷/۵۲	
میان + دو برابر انحراف معیار	۱۱۱۰۰/۷۸	۶۲۸۸/۶۱	۱۱۷/۹۱	۴۲۵/۹۴	۱۸۹۳/۴۹	۱۲۱۷/۰۵	
تعداد نمونه‌ها (N)	۲۵۴	۲۵۴	۲۵۸	۲۵۸	۲۵۸	۲۳۰	۱۷۴



تند خط برازش شده سمت راست) و درصد مساحت زیر جامعه‌ها (تصویر قائم خط برازش شده بر محور مساحت)، حد آستانه‌ای عنصر روی در رسوبات آبراهه‌ای منطقه برابر ۷۷۳۹ پی‌پی‌ام می‌باشد. در نهایت برای عنصر روی چهار جامعه شناسایی گردید که سه جامعه سمت چپ به‌عنوان زمینه و جامعه سمت راست به‌عنوان جامعه‌انومال مورد شناسایی واقع شد.

#### تفسیر ژئوشیمیایی نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر مس

در نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر مس (شکل ۲-ج)، بعد فرکتال جامعه سمت راست با معادله زیر تفاوت معناداری را نسبت به جامعه دوم ( $\alpha_2=3.31$ ) و جامعه سوم ( $\alpha_3=0.52$ ) دارد.

$$A(\text{Cu} > 60.7) = 10^{15.76} \times (\text{Cu}^{-7.15}), \quad \alpha_1 = 7.15$$

این احتمالاً نشانگر وجود دو مرحله کانی‌سازی اصلی (دو جامعه سمت راست) و یک مرحله کانی‌سازی فرعی (جامعه سمت چپ) برای عنصر مس می‌باشد. بر اساس تغییرات بعد فرکتال جوامع ژئوشیمیایی (شیب تند خط برازش شده سمت راست) و درصد مساحت زیر جامعه‌ها (تصویر قائم خط برازش شده بر محور مساحت)، حد آستانه‌ای عنصر مس در رسوبات آبراهه‌ای منطقه برابر ۶۰۷ پی‌پی‌ام می‌باشد. در نهایت برای عنصر مس سه جامعه شناسایی گردید که دو جامعه سمت چپ به‌عنوان زمینه و جامعه سمت راست به‌عنوان جامعه‌انومال مورد شناسایی واقع شد.

#### تفسیر ژئوشیمیایی نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر نیکل

در نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر نیکل (شکل ۲-د)، بعد فرکتال جامعه سمت راست با معادله زیر تفاوت معناداری را نسبت به جامعه دوم ( $\alpha_2=1.32$ ) و جامعه سوم ( $\alpha_3=0.17$ ) دارد.

$$A(\text{Ni} > 231) = 10^{13.7} \times (\text{Ni}^{-4.62}), \quad \alpha_1 = 4.62$$

این احتمالاً نشانگر وجود دو مرحله کانی‌سازی فرعی (دو جامعه سمت چپ) و یک مرحله کانی‌سازی اصلی (جامعه سمت راست) برای عنصر نیکل می‌باشد. بر اساس تغییرات بعد فرکتال جوامع ژئوشیمیایی (شیب تند خط برازش شده سمت راست) و درصد مساحت زیر جامعه‌ها (تصویر قائم خط برازش شده بر محور مساحت)، حد آستانه‌ای عنصر نیکل در رسوبات آبراهه‌ای منطقه برابر ۲۳۱ پی‌پی‌ام می‌باشد. در نهایت برای عنصر نیکل سه جامعه شناسایی گردید که دو جامعه سمت چپ به‌عنوان زمینه و جامعه سمت راست به‌عنوان جامعه‌انومال مورد شناسایی واقع شد.

#### تفسیر ژئوشیمیایی نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر منگنز

در نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر منگنز (شکل ۲-ه)، بعد فرکتال جامعه سمت راست با معادله زیر تفاوت معناداری را نسبت به جامعه دوم ( $\alpha_2=7.69$ ) و جامعه سوم ( $\alpha_3=0.74$ ) دارد.

$$A(\text{Mn} > 1605.6) = 10^{18.61} \times (\text{Mn}^{-5.23}), \quad \alpha_1 = 5.23$$

این احتمالاً نشانگر وجود دو مرحله کانی‌سازی اصلی (دو جامعه سمت راست) و یک مرحله کانی‌سازی فرعی (جامعه سمت چپ) برای عنصر منگنز می‌باشد. بر اساس تغییرات بعد فرکتال جوامع ژئوشیمیایی (شیب تند خط برازش شده سمت راست) و درصد مساحت زیر جامعه‌ها (تصویر قائم خط برازش شده بر محور مساحت)، حد آستانه‌ای عنصر منگنز در رسوبات آبراهه‌ای منطقه برابر ۱۶۰۵/۶ پی‌پی‌ام می‌باشد. در نهایت برای عنصر منگنز سه جامعه شناسایی گردید که دو جامعه سمت چپ به‌عنوان زمینه و جامعه سمت راست به‌عنوان جامعه‌انومال مورد شناسایی واقع شد.

و از این معادله، رابطه بین عیار و مساحت‌های حوضه‌های آبریز بر اساس Carranza, 2009 بدست آمد.

$$A(\text{Pb} > 12202) = 10^{16.76} \times (\text{Pb}^{-3.50})$$

که با توجه به رابطه (۱)، بُعد این خط برابر  $\alpha_1=3.50$  می‌باشد. در مورد خطوط برازش شده بر جوامع دیگر نیز معادلات زیر به‌دست آمد:

$$\alpha_2=0.48 \quad A(87 < \text{Pb} \leq 12202) = 10^{4.54} \times (\text{Pb}^{-0.48})$$

$$\alpha_3=0.80 \quad A(37.5 < \text{Pb} \leq 87) = 10^{5.16} \times (\text{Pb}^{-0.80})$$

$$\alpha_4=0.24 \quad A(\text{Pb} \leq 37.5) = 10^{4.24} \times (\text{Pb}^{-0.24})$$

بدین ترتیب، برای هر چهار جامعه، مقادیر آستانه‌ای و بُعد فرکتال محاسبه گردید (شکل ۲-الف). بُعد فرکتال جامعه اول تفاوت معناداری را نسبت به بقیه جوامع دارد که این احتمالاً نشانگر دوفاز کانی‌سازی می‌باشد. این دوفاز کانی‌سازی، در تفسیر ژئوشیمیایی نمودار لگاریتمی عیار - مساحت، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس تغییرات بعد فرکتال جوامع ژئوشیمیایی (شیب تند خط برازش شده سمت راست) و درصد مساحت زیر جامعه‌ها (تصویر قائم خط برازش شده بر محور مساحت)، حد آستانه‌ای عنصر سرب در رسوبات آبراهه‌ای منطقه برابر ۱۲۲۰۲ پی‌پی‌ام می‌باشد. در نهایت برای عنصر سرب چهار جامعه حاصل گردید که سه جامعه سمت چپ به‌عنوان زمینه و جامعه سمت راست به‌عنوان جامعه‌انومال مورد شناسایی واقع شد. روش فوق برای عناصر روی، مس، نیکل، منگنز، آرسنیک و طلا در منطقه انگوران به‌کار گرفته شد (جدول ۶).

#### تخمین مقادیر زمینه، حد آستانه و آنومالی به روش فرکتال عیار - مساحت

اگر سطح ژئوشیمیایی مورد مطالعه فرکتال باشد، یک رابطه خطی مستقیم منفرد یا مونوفرکتال ظاهر می‌شود. ولی در این تحقیق، چندین خط مستقیم ظاهر شدند که نشانگر رفتار مولتی فرکتال است. به بیان دیگر، رفتارهای ژئوشیمیایی و ناهنجاری‌های زمینه به‌طور معمولی از توزیع‌های نمایی مختلف تبعیت می‌کنند، از این رو باعث ایجاد نمودارهای مولتی فرکتال می‌شوند.

#### تفسیر ژئوشیمیایی نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر روی

بر اساس Gilg, et al., 2006، مطالعات حرارت‌سنجی به‌کمک سیالات - درگیر بر روی چندین نمونه اسفالریت از منطقه سولکان نشان داد که دو فاز کانی - سازی در منطقه رخ داده است که در دو بازه‌دمایی مختلف نهشته شده‌اند. علاوه بر این، مطالعات ژئو کروئولوژی و مطالعات ایزوتوپی گوگرد ( $\delta^{34}\text{S}$ ) و سرب بر روی همان نمونه‌ها نشان داد که کانی‌سازی در منطقه سولکان در دو بازه‌زمانی مختلف زمین‌شناسی رخ داده است. با دانستن این مطلب و باتوجه به اینکه در نمودار لگاریتمی عیار در برابر مساحت تجمعی، نقاط شکست نمودار توأم با تغییرات قابل - توجه بعد فرکتال، نمایانگر تغییر از زمینه به آنومالی و نیز نمایانگر مراحل کانی - سازی یا غنی‌شدگی یک عنصر می‌باشد (Agterberg, et al., 1996; Goncalves, et al., 2001; Carranza, 2009)، در نمودار لگاریتمی عیار - مساحت عنصر روی (شکل ۲-ب)، مشاهده می‌شود که بعد فرکتال جامعه سمت راست با معادله زیر تفاوت معناداری را نسبت به بقیه جوامع ( $\alpha_2=0.6$ )، دارد. ( $\alpha_3=1.66$ ,  $\alpha_4=0.23$ )

$$A(\text{Zn} > 7739) = 10^{18.47} \times (\text{Zn}^{-4.13}), \quad \alpha_1 = 4.13$$

بر اساس مطالب مذکور، این احتمالاً نشانگر وجود سه مرحله کانی‌سازی فرعی (سه جامعه سمت چپ) و یک مرحله کانی‌سازی اصلی (جامعه سمت راست) برای عنصر روی می‌باشد. بر اساس تغییرات بعد فرکتال جوامع ژئوشیمیایی (شیب

شامل پی سنگ شیبست (آمفیبولیت، سرپانتینیت) و کوارتز- مسکویت شیبست با میان لایه‌های مرمر است. محدوده‌های آنومال منگنز و طلا، در چهار نقطه به شکل پراکنده در بخش جنوب شرقی منطقه واقع گردیده است که شامل واحدهای سنگی ریولیت و سنگ‌های آذرآواری با رنگ روشن، تراورتن و بازالت به شکل سیل و دایک می‌باشد.

### نتیجه گیری

الف- مطالعه اولیه نقشه‌های ژئوشیمیایی عناصر، نشان دهنده وابستگی مقدرسرب به مقدارروی است. مقدار ضریب همبستگی محاسبه شده به روش- ناپارامتری اسپیرمن که معادل ۰/۶۱۶ است نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

ب- توزیع فراوانی عنصرطلا در تعداد ۲۵۸ نمونه رسوب آبراهه‌ای برداشت شده از منطقه‌انگوران، دارای توزیع نرمال و عناصر سرب، روی، مس، نیکل، منگنز و آرسنیک دارای توزیع لاگ نرمال می‌باشند.

ج- بررسی‌ها نشان داد که آنومالی سرب و روی که در هم پوشانی با آنومالی آرسنیک نیز قرار دارد با وسعت تقریبی ۲/۵ کیلومتر مربع در منطقه سولکان واقع- گردیده است. واحدهای سنگی محدوده آنومالی مذکور، آمفیبولیت با میان لایه‌های آهک توده‌ای تا ضخیم لایه است. این هم پوشانی باتوجه به مقدار ضریب همبستگی آرسنیک با سرب و روی که به ترتیب معادل ۰/۶۹۷ و ۰/۴۸۳ محاسبه گردید نشان می‌دهد که آرسنیک می‌تواند معرف مناسبی برای سرب و روی در منطقه باشد. همچنین دمنطقه امیدبخش برای مس بدست آمد یکی در شمال شرقی روستای امیرآباد که در هم پوشانی با آنومالی نیکل نیز قرار دارد و دیگری در جنوب غرب روستای امیرآباد که مکان مناسبی برای ادامه اکتشاف می‌باشد (شکل ۴).

د- براساس روش عیار- مساحت مشخص شد که دو فاز کانی سازی مربوط به سرب و روی در منطقه انگوران وجود دارند که این نتیجه، احتمالاً می‌تواند منطبق بر مشاهدات زمین شناسی مبنی بر اکسیدی- سولفیدی بودن کانی‌های عناصر مذکور در منطقه انگوران باشد.

ه- در جدول ۷، حدآستانه بدست آمده از روش آمار کلاسیک برابر «میان + دو برابر انحراف معیار» است. به بیان دیگر تفسیر و پردازش داده‌ها در روش آمار کلاسیک تنها براساس مقادیر غلظت و عیار داده‌های برداشت شده می‌باشد لذا، احتمال می‌رود که بعضی از محدوده‌های معرفی شده توسط این روش به عنوان آنومالی کاذب باشند. در حالی که، حدآستانه بدست آمده از روش فرکتال، نه تنها فراوانی مربوط به داده‌های ورودی (عیار عناصر مختلف) را نشان می‌دهد، بلکه مشخصات فضایی و هندسی منعکس شده توزیع را نیز، براساس مدل عیار- مساحت، مشخص می‌سازد در نتیجه، بامقایسه بین حدود زمینه ناشی از روش فرکتال عیار- مساحت و آمار کلاسیک و مساحت‌های آنومال معرفی شده توسط هریک از روش‌های مذکور، توانمندی روش فرکتال عیار- مساحت در تعیین حدود آستانه دقیق و کاهش مساحت‌های آنومالی و در نهایت کاهش هزینه‌های اکتشافی در مراحل آتی اثبات گردید (جدول ۷).

### تقدیر و تشکر

این پژوهش حاصل طرح تحقیقاتی «بررسی‌های ژئوشیمیایی و زمین آماری منطقه انگوران، ۱۳۹۲» می‌باشد که با حمایت دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) انجام شد، بنابراین از همکاری این دانشکده قدرانی می‌شود. همچنین نویسندگان لازم می‌دانند از همکاری صمیمانه داوران محترم مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته که با انتقادات و پیشنهادات سازنده خود باعث ارتقاء سطح علمی این مقاله گردیدند، سپاسگزاری نمایند.

### تفسیر ژئوشیمیایی نمودار لگاریتمی عیار- مساحت عنصر آرسنیک

در نمودار لگاریتمی عیار- مساحت عنصر آرسنیک (شکل ۲- و)، بعد فرکتال جامعه سمت راست با معادله زیر تفاوت معناداری را نسبت به جامعه دوم ( $\alpha_2=0.96$ ) و جامعه سوم ( $\alpha_3=0.13$ ) دارد.

$$A(As > 668) = 10^{11.25} \times (As)^{-3.07}, \quad \alpha_1 = 3.07$$

این احتمالاً نشانگر وجود دو مرحله کانی سازی فرعی (دو جامعه سمت چپ) و یک مرحله کانی سازی اصلی (جامعه سمت راست) برای عنصر آرسنیک می‌باشد. براساس تغییرات بعد فرکتال جوامع ژئوشیمیایی (شیب تند خط برازش شده سمت- راست) و درصد مساحت زیر جامعه‌ها (تصویر قائم خط برازش شده بر محور مساحت)، حدآستانه‌ای عنصر آرسنیک در رسوبات آبراهه‌ای منطقه برابر ۶۶۸ پی پی ام می‌باشد. در نهایت برای عنصر آرسنیک سه جامعه شناسایی گردید که دو جامعه سمت چپ به عنوان زمینه و جامعه سمت راست به عنوان جامعه آنومال مورد شناسایی واقع شد.

### تفسیر ژئوشیمیایی نمودار لگاریتمی عیار- مساحت عنصر طلا

در نمودار لگاریتمی عیار- مساحت عنصر طلا (شکل ۳)، بعد فرکتال جامعه سمت راست با معادله زیر تفاوت معناداری را نسبت به جامعه دوم ( $\alpha_2=1.07$ ) و جامعه سوم ( $\alpha_3=0.14$ ) دارد.

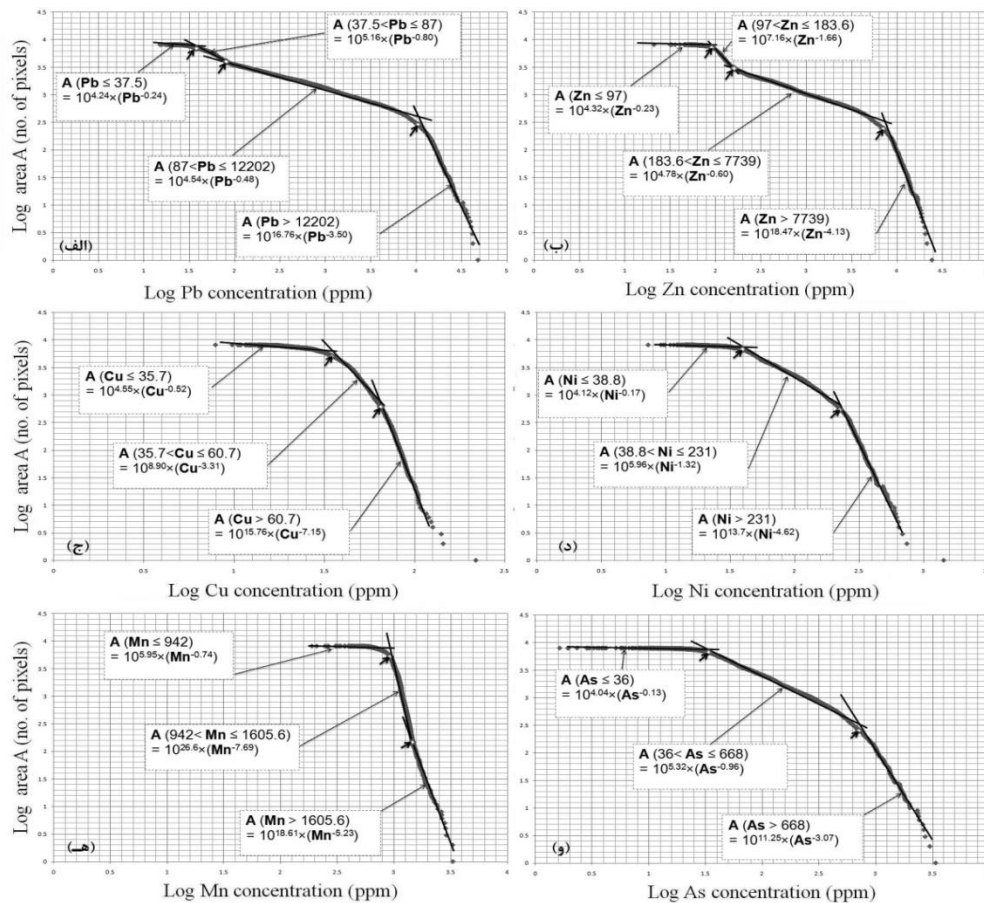
$$A(Au > 14.64) = 10^{13.86} \times (Au)^{-5.83}, \quad \alpha_1 = 5.83$$

این احتمالاً نشانگر وجود دو مرحله کانی سازی فرعی (دو جامعه سمت چپ) و یک مرحله کانی سازی اصلی (جامعه سمت راست) برای عنصر طلا می‌باشد. براساس تغییرات بعد فرکتال جوامع ژئوشیمیایی (شیب تند خط برازش شده سمت راست) و درصد مساحت زیر جامعه‌ها (تصویر قائم خط برازش شده بر محور مساحت)، حدآستانه‌ای عنصر طلا در رسوبات آبراهه‌ای منطقه برابر ۱۴/۶۴ پی پی ام می‌باشد. در نهایت برای عنصر طلا سه جامعه شناسایی گردید که دو جامعه سمت چپ به- عنوان زمینه و جامعه سمت راست به عنوان جامعه آنومال مورد شناسایی واقع شد.

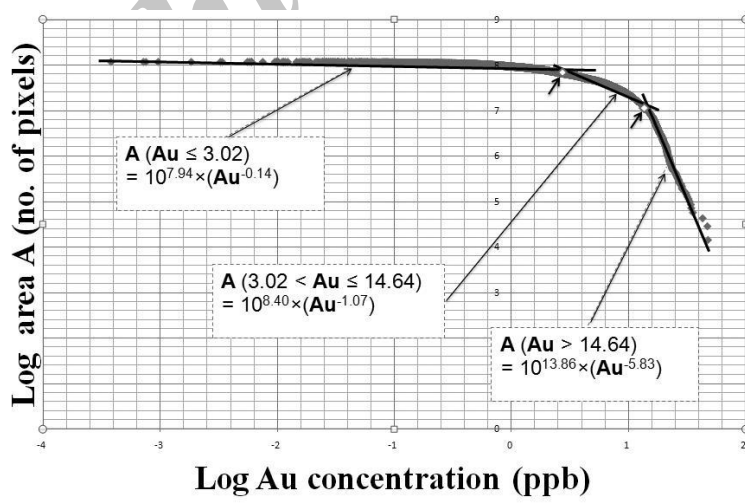
### نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی عناصر

براساس نقشه توزیع آنومالی‌های قطعی عناصر منتخب در منطقه انگوران (شکل ۴) محدوده آنومال سرب، روی و آرسنیک با وسعت تقریبی ۲/۵ کیلومتر مربع در بخش شمال شرقی منطقه واقع گردیده است که شامل واحدهای سنگی آمفیبولیت- کلاسیک شیبست بامیان لایه‌های آهک توده‌ای تا ضخیم لایه و در برخی جاها مرمر لایه‌ای است. در بخش‌هایی از مرز شیبست با آهک، در مجاورت سطوح گسلی، دگرسانی هیدروترمالی مشاهده می‌شود. هم پوشانی آنومالی آرسنیک که بیشتر بصورت رگه‌های زرنیخ در منطقه رخنمون دارد با آنومالی سرب و روی آن- هم بصورت گالن و اسفالریت، احتمالاً به ماهیت ژنتیکی نزدیک آنها مربوط شود چراکه هرسه عنصر در قالب کانی‌های نامبرده، معمولاً در درجه حرارت کم و نزدیک سطح نهشته می‌شوند (حسنی پاک، ۱۳۸۱). براساس نقشه مذکور، یک محدوده آنومال مس، با وسعت تقریبی پنج کیلومتر مربع در بخش شمالی منطقه واقع گردیده که شامل پی سنگ شیبست (آمفیبولیت، سرپانتینیت) و کوارتز- مسکویت شیبست با میان لایه‌های مرمر است. همچنین یک محدوده آنومال دیگر مس، با وسعت تقریبی سه کیلومتر مربع در بخش جنوب غربی منطقه واقع گردیده که شامل واحدهای سنگی ریولیت و سنگ‌های آذرآواری با رنگ روشن می‌باشد. غیر از دو آنومالی فوق، محدوده‌های آنومال دیگری نیز به شکل پراکنده و با ابعاد کوچکتر در منطقه به چشم می‌خورند. براساس همان نقشه، محدوده آنومال نیکل، با وسعت تقریبی پنج کیلومتر مربع در بخش شمالی منطقه واقع گردیده است که

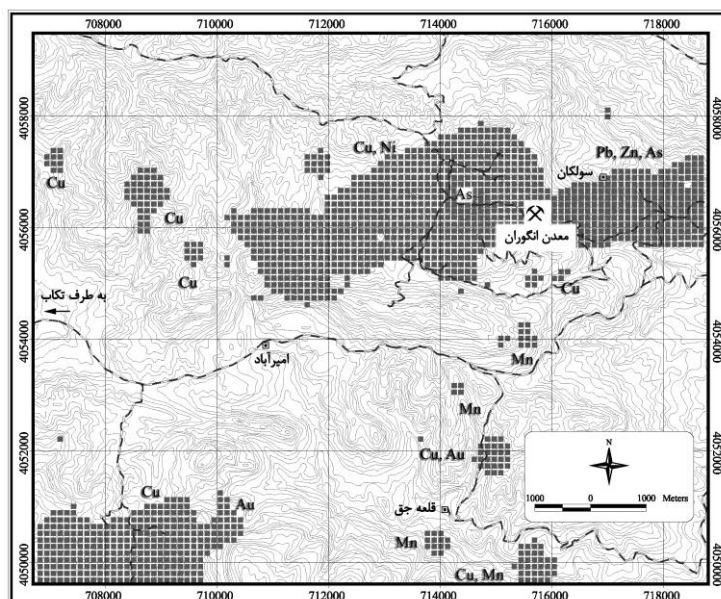




شکل ۲. نمودار لگاریتمی مساحت های حوضه های آبریز هرمنونه برحسب عیار متناظر آن برای تخمین حدزمینه و حدانومالی عناصر دارای توزیع فراوانی لاگ نرمال؛ ابعاد هر سلول ۱۲۰متر در ۱۲۰متر.



شکل ۳. نمودار لگاریتمی مساحت های حوضه های آبریز هرمنونه برحسب عیار متناظر آن برای تخمین حدزمینه و حدانومالی عناصر دارای توزیع فراوانی نرمال؛ ابعاد هر سلول ۱۲۰متر در ۱۲۰متر.



شکل ۴. نقشه توزیع آنومالی های قطعی عناصر منتخب در منطقه انگوران.

جدول ۶. اطلاعات حاصل از روش فرکتال.

بُعد فرکتال زیر جامعه‌ها	تفسیر ژئوشیمیایی	مساحت زیر جامعه‌ها (درصد)	حدود تغییرات عیار	متغیر
۰/۲۴	Low background	۱۲	$\leq ۳۷/۵$	سرب
۰/۸۰	Background	۴۲	۳۷/۵ - ۸۷	
۰/۴۸	High background	۴۳	۸۷ - ۱۲۲۰۲	
۳/۵۰	Anomaly	۰۳	$> ۱۲۲۰۲$	
۰/۲۳	Low background	۱۵	$\leq ۹۷$	روی
۱/۶۶	Background	۵۲	۳۷/۵ - ۱۸۳/۶	
۰/۶۰	High background	۳۱	۸۷ - ۷۷۳۹	
۴/۱۳	Anomaly	۰۳	$> ۷۷۳۹$	
۰/۵۲	Low background	۳۹	$\leq ۳۵/۵$	مس
۳/۳۱	Background	۵۱	۳۵/۷ - ۶۰/۷	
۷/۱۵	Anomaly	۱۰	$> ۶۰/۷$	
۰/۱۷	Low background	۱۶	$\leq ۳۸/۸$	نیکل
۱/۳۲	Background	۷۸	۳۸/۸ - ۲۳۱	
۴/۶۴	Anomaly	۰۷	$> ۲۳۱$	
۰/۷۴	Low background	۳۹	$\leq ۹۴۲$	منگنز
۷/۶۹	Background	۶۰	۹۴۲ - ۱۶۰۵/۶	
۵/۲۳	Anomaly	۰۱	$> ۱۶۰۵/۶$	
۰/۱۳	Low background	۱۹	$\leq ۳۶$	آرسنیک
۰/۹۶	Background	۷۷	۳۶ - ۶۶۸	
۳/۰۷	Anomaly	۰۴	$> ۶۶۸$	
۰/۱۴	Low background	۴۶	$\leq ۳/۰۲$	طلا
۱/۰۷	Background	۴۵	۳/۰۲ - ۱۴/۶۴	
۵/۸۳	Anomaly	۰۹	$> ۱۴/۶۴$	

جدول ۷. مقایسه بین حدود آستانه ناشی از روش فرکتال عیار- مساحت و آمار کلاسیک؛ طلا بر حسب ppb و بقیه عناصر بر حسب ppm می باشد.

متغیر	سرب	روی	مس	نیکل	منگنز	آرسنیک	طلا
حد آستانه ناشی از آمار کلاسیک:	۱۱۱۰۰/۷۸	۶۲۸۸/۶۱	۱۱۷/۹۱	۴۲۵/۹۴	۱۸۹۳/۴۹	۱۲۱۷/۰۵	۲۳/۹۰
حد آستانه ناشی از روش فرکتال عیار- مساحت:	۱۲۲۰۲/۰۰	۷۷۳۹/۰۰	۶۰/۷۰	۲۳۱/۰۰	۱۶۰۵/۶۰	۶۶۸/۰۰	۱۴/۶۴

## منابع

- باباخانی، ع. ر.، عمرانی، ج.، موسوی، ع.، عبدالمهی، ح. ر.، ۱۳۸۱، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه انگوران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور و شرکت توسعه معادن روی ایران، منتشر نشده.
- باباخانی، ع. ر.، قلمقاش، ج.، ۱۳۸۰، برگه شماره ۵۴۶۳ تخت سلیمان، از سری نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- حسنی پاک، ع. الف.، ۱۳۸۱، «اصول اکتشافات ژئوشیمیایی»، تهران: مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ ششم، ۶۱۵ صفحه.
- حسنی پاک، ع. الف.، شرف الدین، م.، ۱۳۸۴، «تحلیل داده های اکتشافی»، تهران: مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ دوم، ۹۸۷ صفحه.
- شکورزاده، ج. رهبر، الف.، ۱۳۸۵، «تحلیل زمین شناسی و منابع معدنی استان زنجان»، سازمان صنایع و معادن استان زنجان، ۸۲ صفحه، زنجان، منتشر نشده.
- علوی نائینی، م.، حاجیان، ج.، بلورچی، ح.، عمیدی، م.، طاوسی، س.، آقایی، ا.، پلی سیر، ج.، ۱۳۶۱، گزارش زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش تکاب- صائین قلعه، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، انتشارات سازمان انرژی اتمی ایران، تهران.
- فیضی، الف.، ۱۳۹۲، بررسی های ژئوشیمیایی و زمین آماری معدن سرب و روی انگوران، استان زنجان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی.
- مدنی، ح.، ۱۳۹۰، مبانی اکتشاف مواد معدنی، جلد اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران، چاپ اول، صفحه ۱۰۳۰.
- Agterberg, F.P., et al., 1996, Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholiths Manitoba, *Comput. Geosci.* 22(5), 497-507.
- Cheng, Q., et al., 1994, The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods, *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 5, p. 109-130.
- Davis, J.C., 2002, *Statistics and data analysis in Geology* (3th ed.), John Wiley & Sons Inc., New York, p. 342-353.
- Gilg, H. A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C. R., Banks, D., Moore, F., 2006, Marble-hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic, Springer, *Miner Deposita*, p. 1-16.
- Goncalves, M.A., et al., 2001, Geochemical anomaly separation by multifractal modeling, *Journal of Geochemical Exploration*, p. 91-114.
- Hale, M. (Series Editor), *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Volume 11: Carranza, E., 2009, Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*, Elsevier, p. 92-114.
- Li, C.; Ma, T. and Shi, J., 2003, Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background, *Journal of Geochemical Exploration*, p. 167-175.
- Pride, K.R., G.G. Griesbach, and A.W. Workman, Report of WGM & IZMDC Exploration Activities, Angouran Exploration Project, Zanjan Province, Islamic Republic of Iran, 2004: Toronto, Not published.