



## جداسازی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی عناصر خاکی نادر با استفاده از مدل فرکتالی عیار-مساحت در آنومالی ۵ ساغند (ایران مرکزی)

معصومه خلیج معصومی\*<sup>۱</sup>، محمد لطفی<sup>۲</sup>، ایوب معمار کوچه‌باغ<sup>۳</sup>، پیمان افضل<sup>۴</sup>، بهنام صادقی<sup>۵</sup>، احمد خاکزاد<sup>۶</sup>

۱. مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، صندوق پستی: ۳۱۷۴۶۷۴۸۴۱، البرز-ایران

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، صندوق پستی: ۱۶۶۷۹۳۴۷۸۳، تهران-ایران

۳. پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۳۶۵، تهران-ایران

۴. گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، صندوق پستی: ۴۴۳۵-۱۳۶۵، تهران-ایران

**چکیده:** محدوده‌ی مورد مطالعه در آنومالی پنج ساغند، در منطقه‌ی ساختاری ایران مرکزی قرار دارد. کانی‌سازی اورانیم، توریم و عناصر خاکی نادر در منطقه‌ی ساغند، به طور عمده از نوع گرمایی و متاسوماتیت وابسته به توده‌های نفوذی منطقه و مرتبط با عناصر پرتوزا است. جداسازی ناهنجاری از زمینه یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین مرحله‌ها در اکتشافات ژئوشیمیایی است. روش‌های مختلفی برای جداسازی و تشخیص منطقه‌های ناهنجار از زمینه وجود دارد که عبارت‌اند از روش‌های آماری ساده تا روش‌های پیچیده‌ی فرکتالی. روش‌های فرکتالی به دلایلی چون استفاده از تمام داده‌ها، در نظر گرفتن پراکنندگی فضایی آن‌ها اخیراً کاربرد مؤثری در بررسی‌های سطحی زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی پیدا کرده‌اند. در منطقه‌ی ساغند، عناصر خاکی نادر هم‌بستگی مثبت زیادی با کانی‌سازی عناصر پرتوزا (اورانیم و توریم) نشان می‌دهند. جداسازی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی عناصر خاکی نادر از زمینه (از ۱۵ عنصر مورد تجزیه‌ی عناصر خاکی نادر تنها عناصر La, Gd, Dy, Y, Ce در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند) با کمک روش فرکتالی عیار-مساحت، بر روی داده‌های لیتوژئوشیمیایی (۹۱ نمونه) در محدوده‌ی ساغند انجام شده است. در این روش، نمودارهای Log-Log ترسیم، ناهنجاری‌ها مشخص و جامعه‌های کانی‌سازی تفکیک و سپس نقشه‌های ناهنجاری عناصر تهیه و مناطق امیدبخش معرفی شدند. در نهایت، براساس نتایج به دست آمده، مشخص شد که ناهنجاری‌های عناصر خاکی نادر، به ترتیب اولویت در سه بخش غربی و جنوب غربی، مرکزی و جنوبی هستند. بخش مرکزی در واحدهای متاسوماتیت واقع شده و با دگرسانی‌های اپیدوتی و کلریتی مرتبط است و بخش جنوبی منطقه، در مرز بین واحدهای متاسوماتیت و دایک‌های بازیگ میکرودیوریت واقع شده که مرتبط با دگرسانی اپیدوتی هستند. ناهنجاری‌های شدیدتر، در غرب منطقه در واحدهای متاسوماتیت، میکرودیوریت‌های پورفیری و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی متاسوماتیسم شده، با دگرسانی اپیدوتی مرتبط بودند. از بررسی نقشه‌های ژئوشیمیایی با زمین‌شناسی مشخص شد که کانی‌سازی عناصر پرتوزا در منطقه از نوع متاسوماتیت است، که سنگ‌های اولیه‌ی منطقه، شامل واحدهای سنگی آذرآواری، دیابازها، داسیت پورفیری و گابرو را تحت تأثیر متاسوماتیسم قرار داده و انواع سنگ‌های اصلی منطقه، شامل آمفیبول متاسوماتیت، آمفیبول-آلیبت متاسوماتیت، آمفیبول-کوارتز-فلدسپات متاسوماتیت، آمفیبول-فلدسپار-اپیدوت متاسوماتیت و آمفیبول-بیوتیت-ارتوز-تالک-کلریت-اپیدوت متاسوماتیت را در منطقه به وجود آورده است؛ عناصر خاکی نادر به صورت کمپلکس با عناصر پرتوزا در کانی‌های اورانیم و توریم‌دار (اورانینیت و دیویدیت) ظاهر می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** عناصر خاکی نادر، مدل فرکتالی، عیار-مساحت (C-A)، آنومالی ۵ ساغند، ایران مرکزی





## ۱. مقدمه

بیش تر در شبیه‌سازی مدل‌های طبیعی برگرفته از طبیعت است. در هندسه‌ی اقلیدسی شکل‌ها براساس مقیاس تغییر می‌کنند، در مقابل، هندسه‌ی فرکتالی مستقل از مقیاس و براساس یک ویژگی تکرارپذیر و خودتشابهی براساس سیمای طبیعت پیرامون ما مدلی ارائه می‌دهد. در هندسه‌ی اقلیدسی تمامی موضوع‌ها و مدل‌های ارائه شده، به وسیله معادله‌های تحلیلی بررسی می‌شوند، اما در هندسه‌ی فرکتالی معادله‌ی حاکم، معادله‌ای با تابع تکرارپذیر و دورپذیر است. شکل‌هایی که در هندسه‌ی اقلیدسی مورد مطالعه قرار می‌گیرند وضعیت ثابتی دارند ولی در هندسه‌ی فرکتالی شکل‌ها عموماً تکراری و کاملاً حالت قطعه‌بندی دارند. هندسه‌ی اقلیدسی خاصیت مشتق‌پذیری دارد، ولی در هندسه‌ی فرکتالی مشتق‌پذیری مفهومی ندارد. اجزای سازنده‌ی شکل‌های اقلیدسی، نقطه‌ها، خط‌ها، صفحه‌ها و حجم‌ها هستند، ولی هندسه‌ی فرکتالی، یک پارامتر جزء سازنده‌ی اولیه یا وضعیت اولیه یا موقعیت اولیه دارد و در فرکتال مشتق‌پذیری وجود ندارد چون جزءها تکرارپذیرند. در واقع جزء اولیه آن‌چنان تکرار می‌شود که به صورت یک حجم مشاهده می‌شود که از تکرار زیاد آن، جزء اولیه‌ی سازنده خود به دست می‌آید. ویژگی برجسته‌ی بعضی از پدیده‌های زمین‌شناسی و معدنی اغلب وجود فرایندهایی در ارتباط با اغتشاش در پوسته‌ی زمین است که هندسه‌ی فرکتالی با توانایی بیش‌تر از روش‌های قدیمی و آماری می‌تواند در این پدیده‌های معدن‌ساز پیش‌دآوری کند [۵]. در این میان روش فرکتالی عیار-مساحت کاربرد گسترده‌ای در حصول نقشه‌های دو بُعدی و جداسازی ناهنجاری‌ها از زمینه دارد. زمین‌شناسان این نکته را متذکر شده‌اند که الگوهای پراکنندگی ژئوشیمیایی دارای بعدها فرکتالی‌اند؛ زیرا، آن‌ها دارای خواص مشابه در اندازه‌های گوناگون از مقیاس میکروسکوپی تا قاره‌ای‌اند [۳، ۶]. امروزه، تحلیل‌های ریاضی، نقشی اساسی در زمین‌شناسی یافته‌اند [۷، ۸]. مدل‌های فرکتالی، ابزار قدرتمندی را برای توصیف کانه‌های ایجاد شده در طی فرایند کانی‌سازی مهیا می‌کنند [۹]. هم‌چنین، روش‌های تحلیل فرکتالی، برای توصیف و تشریح رابطه‌های میان جامعه‌های کانی‌یابی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناختی با داده‌های فضایی حاصل از تجزیه‌های کانسارها به کار می‌روند [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵]. البته، یک مزیت بسیار مهم روش‌های فرکتالی نسبت به روش‌های کلاسیک، این است

عناصر خاکی نادر، بنا به دلایل مختلف از جمله کشف دیر هنگام، رخداد کم در طبیعت، نداشتن تقاضا در بازار، فرایند استحصال بسیار دشوار، تنها در چند سال اخیر در صنایع مورد توجه قرار گرفته‌اند. افزایش روزافزون استفاده از عناصر خاکی نادر در صنایع مختلف از جمله صنایع هسته‌ای، نظامی، علوم پزشکی، کاربرد آن‌ها در ساخت ابررساناها، لامپ‌های خلاء، لیزر و بسیاری موارد دیگر سبب شده تا توجه ویژه‌ای به این عناصر شود [۱]. در مرحله‌های اولیه‌ی اکتشاف مواد معدنی و مرحله‌های پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی، برای تعیین و تفکیک دقیق‌تر جامعه‌ی ناهنجاری از مقدارهای زمینه در کانسارهای مختلف، روش‌های سنتی و قدیمی به تدریج جای خود را به روش‌های نوین که از طبیعت الهام گرفته‌اند، می‌دهند. یکی از این روش‌ها استفاده از هندسه‌ی فرکتال در جداسازی جامعه‌های مختلف در مقایسه با روش‌های قبلی آمار کلاسیک است. روش‌های فرکتالی به دلیل استفاده از تمامی داده‌ها و در نظر گرفتن رابطه‌ی فضایی آن‌ها با هم دارای دقت بیش‌تری نسبت به روش‌های آماری کلاسیک هستند، چرا که در این روش‌ها هیچ‌گونه جرح و تعدیلی روی داده‌ها انجام نمی‌شود و تحلیل، عملاً روی داده‌های واقعی انجام می‌شود [۲، ۳، ۴]. در سال ۱۹۸۳ هندسه‌ی فرکتالی توسط پروفیسور بنویت ماندلبروت پیشنهاد شد [۵]. ماندلبروت وقتی که بر روی پژوهشی پیرامون طول ساحل‌های انگلیس مطالعه می‌نمود، به این نتیجه رسید که این طول هرگاه با مقیاس بزرگ اندازه گرفته شود بیش‌تر از زمانی است که مقیاس کوچک‌تر باشد. این، به شکستگی بسیار خطوط ساحلی و عدم تبعیت آن‌ها از یک بُعد منظم برمی‌گشت. ایشان در این‌جا هندسه‌ای را ارائه نمود که در آن بُعد اجسام تنها از بُعدهای با اعداد صحیح پیروی نمی‌کند و به صورت گسسته نیست، بلکه بُعدها می‌توانند به حالت اعشاری، نامنظم و پیوسته نیز باشند. در سال ۱۹۸۳ ماندلبروت با نوشتن و ارائه‌ی یک کتاب بزرگ و ارزشمند به طور رسمی هندسه‌ی فرکتال را به عنوان یک شاخه‌ی نوین از دانش هندسه به جهانیان معرفی نمود [۵]. هندسه‌ی فرکتالی روش جدیدی است که نسبت به هندسه‌ی اقلیدسی تفاوت‌های زیادی دارد. هندسه‌ی اقلیدسی بیش‌تر در مصنوعات بشر کاربرد دارد در حالی که کاربرد هندسه‌ی فرکتالی



زمینه و توصیف ویژگی‌های کیفی کانی‌سازی‌ها و کانسنگ‌ها به کار می‌روند [۱۹، ۲].

آنومالی پنج‌ساغند، بخشی از منطقه پرتوزای ساغند است که در عملیات اکتشافات هوایی (۱۳۵۷) کشف و توسط شرکت «یورا ایران» عملیات پی‌جویی مقدماتی و ژئوشیمی در مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ انجام و در فرایندهای اکتشاف، از طریق نقشه‌های ژئوفیزیک، ژئوشیمی، زمین‌شناسی و حفر گمانه‌های متعدد در سطح و عمق شناسایی شده است [۲۲]. در زمستان و پاییز سال‌های ۱۳۵۸ و ۱۳۵۹، حمزه‌پور و همکاران براساس عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰، شبکه‌ی پرتوسنجی به فواصل ۲۰۰ متر روی زمین پیاده و در مقیاس ۱:۵۰۰۰ پرتوسنجی با فاصله‌های ۵۰ متر خوانش انجام دادند. مهم‌ترین کانسار اکتشاف شده در محدوده‌ی منطقه ساغند، کانسار اورانیم ساغند است.

## ۲. زمین‌شناسی آنومالی پنج‌ساغند

با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰ تهیه شده در سازمان انرژی اتمی [۲۳] آنومالی ۵ ساغند در منطقه‌ی ساختاری ایران مرکزی و در کمربند متالورژی بافق-رباط پشت بادام قرار دارد (شکل ۱). بخش شمال‌غربی آنومالی ۵ ساغند، رخنمونی از سنگ‌های کربناته‌ی متبلور، طبقه‌های گچ و تخیری‌ها با میان لایه‌های آذرآواری (توفی) و شیل و ماسه‌سنگ است. در این مجموعه، توده‌های ساب‌ولکانیک بازیک از جنس دیاباز وجود دارد و به صورت محلی تحت تأثیر فلدسپاتی شدن و در مواردی سرپانتینی شدن قرار گرفته‌اند. میان لایه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت (از حدود سانتی‌متر تا متر) از سنگ آهن چرتی قرمزرنگ و هماتی-منیتی در توده‌های ساب‌ولکانیک منطقه دیده می‌شود. پی‌گیری لایه‌شناسی به علت زمین‌ساخت شدید منطقه مشکل بود. سن این واحد سنگی، اگر چه به ظاهر ویژگی‌های سازند ریزو و دزو را دارد، نامشخص است. در بخش عمده‌ای از این ناحیه‌ی پرتوزا، که تحت تأثیر متاسوماتیسم قرار گرفته است، تعیین جنس و ویژگی‌های اولیه‌ی سازند میزبان مشکل است. چرخه‌ی اول سنگ‌شناسی این محدوده از طبقات بازالتی یا بالشتک‌های گدازه‌ای و قله‌های درشت شروع و به سمت بالا به تدریج به طبقات آذرآواری و شیلی دارای میان

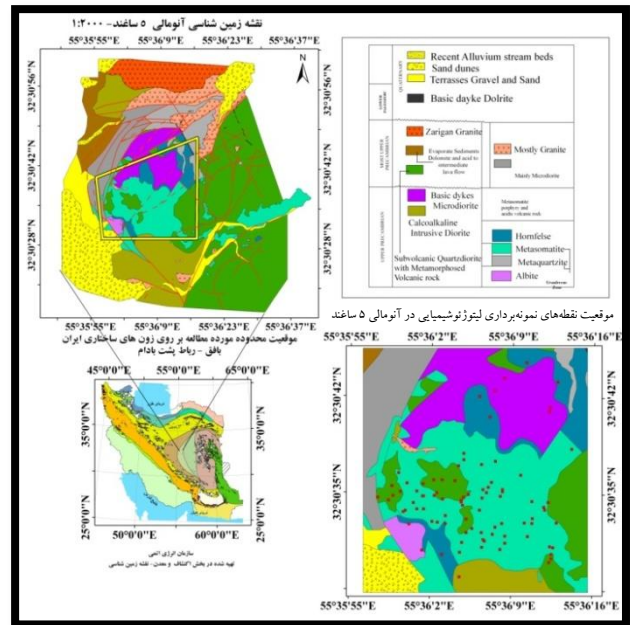
که بحثی با عنوان «منطقه‌ی انتقالی» بی‌معنی می‌شود؛ چون در روش‌های کلاسیک، اصل، جداسازی منطقه‌ها و دگرسانی‌ها با استفاده از کانه‌ها بود، و اگر در نمونه‌ای دو یا چند کانه با هم دیده می‌شدند، امکان جداسازی دقیق منطقه در آن امکان‌پذیر نبود و آن منطقه به صورت انتقالی معرفی می‌شد؛ با روش‌های فرکتالی (مثل روش عیار-حجم)، این مسأله حذف می‌شود [۸، ۱۶]. هندسه‌ی فرکتالی به دو صورت در علوم زمین کاربرد دارد؛ یکی برای تحلیل شکل‌های پیچیده‌ی ساختارهای زمین‌شناسی، به ویژه در شاخه‌های زمین‌شناسی ساختمانی و مهندسی، و دیگری برای جداسازی جامعه‌های ژئوشیمیایی و کانی‌زایی، به ویژه در زمین‌شناسی اقتصادی، اکتشاف معدن و ژئوفیزیک. مطالعه‌هایی که دانشمندان بر روی توزیع عناصر در پوسته‌ی زمین انجام داده‌اند، به خوبی نمایان‌گر تبعیت پراکندگی عناصر از مدل‌های ریاضی است. براساس مدل‌های ریاضی، نخستین بار، تورکوت در سال ۱۹۸۶ نشان داد که بین میزان ذخیره‌ی تجمعی در یک کانسار با عیارهای متوسط بخش‌های مختلف آن یک رابطه‌ی فرکتالی وجود دارد [۱۷]. برای نخستین بار، منگ و ژائو در سال ۱۹۹۱، وجود ساختارهای فرکتالی در داده‌های زمین‌شناسی را گزارش نمودند [۱۸]. آگنبرگ و همکاران (۱۹۹۳)، برای نخستین بار در مورد وجود مدل‌های فرکتالی در نوع‌های مختلف کانسارها بحث نمودند [۱۹]. اما نخستین کار بزرگ در این مورد، ارایه‌ی روش‌های فرکتالی عیار-مساحت [۲] و عیار-محیط [۲، ۲۰] توسط چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۴ برای جداسازی ناهنجاری‌های گوناگون ژئوشیمیایی از یک‌دیگر و هم‌چنین زمینه بود، که نتایج بسیار مثبتی در مطالعه‌های لیتوژئوشیمیایی در کانسار مس-طلا‌ی پورفیری میشل سولفورترز، واقع در استان بریتیش کلمبیا در کانادا از خود نشان دادند [۲]. به طور کلی می‌توان گفت که فرکتال خصوصیات مفید و کاربردی دارد [۲۱]، مثلاً یک ساختار ظریف را در اندازه‌های دل‌خواه ایجاد می‌کند؛ یک حالت خودتشابه دارد و البته دارای ابعادی بیش از ابعاد مکان‌شناختی است [۲].

وجود ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی باعث افزایش بُعد فرکتالی متغیرهای ژئوشیمیایی می‌شود؛ بر این اساس، می‌توان وجود یا عدم وجود ناهنجاری را در یک منطقه مشخص کرد [۷]، لذا، روش‌های فرکتالی، برای جداسازی ناهنجاری‌ها از مقدارهای

تشکیل شده‌اند. در جنوب دوزخ‌دره، برونزد کوچکی از این توده‌ی نفوذی دیده می‌شود. براساس مطالعه‌های رضانی و همکاران یک نمونه‌ی لوکوگرانیت دوزخ‌دره به روش اورانیم-سرب تعیین سن شده است [۲۵]، که سنی برابر ۱+۵۲۵٫۷ میلیون سال دارد [۲۵، ۲۶]. در منتهی‌الیه جنوب شرقی منطقه‌ی مطالعه شده، رخنمونی با تنوع کنگلومرا با قلوها و تخته‌سنگ‌های کربناتی، ملات توفی-گدازه‌ای و لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و کنگلومرای دانه‌ریز وجود دارد. در بخش بالایی این افق، پدیده‌ی متاسوماتیسم رخ نداده و این پدیده در قاعده‌ی این افق متوقف شده است. عدم گسترش پدیده‌ی متاسوماتیسم در واحدهای بالاتر این افق کنگلومرای، و وجود مواد فرسایش یافته از سازندهای قدیمی‌تر (به خصوص مواد پرتوزای واحدهای متاسوماتیتی) و سن کانی‌سازی اورانیم (حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ میلیون سال) نوید این را می‌دهد که این مرز نه تنها به عنوان مرز چینه‌شناسی بلکه به عنوان مرزی در رخدادهای پرکامبرین عمل نموده است [۲۷، ۲۸].

### ۳. روش پژوهش و داده‌های لیتوژئوشیمیایی عناصر خاکی نادر

روش کار بدین صورت بود که از منطقه‌ی مورد مطالعه تعداد ۹۱ نمونه‌ی لیتوژئوشیمیایی به صورت غیر روشمند از واحدهای سنگی متاسوماتیتی منطقه (آمفیبول متاسوماتیت، آمفیبول-آلیت متاسوماتیت و آلیت-آمفیبول متاسوماتیت) براساس نقشه‌ی زمین‌شناسی محدوده‌ی آنومالی ۵ ساغند با مقیاس ۱:۲۰۰۰ برداشت شد. این نمونه‌ها برای تجزیه‌ی ۱۷ عنصر شامل ۱۵ عنصر گروه لانتانیدها- Y, Lu, Yb, Tm, Er, Ho, Dy, Tb, Gd, Sm, Eu, Pm, Nd, Pr, Ce, La، اورانیم و توریم برداشت شده (شکل ۱) با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری-پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP-OES) در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور مورد تجزیه قرار گرفتند. برای جداسازی جامعه‌های ناهنجاری‌های عناصر خاکی نادر و عناصر پرتوزا در منطقه، از روش فرکتالی عیار-مساحت و داده‌های لیتوژئوشیمیایی استفاده شد. به دلیل زیاد بودن تعداد عناصر، نقشه‌های فرکتالی عیار-مساحت تنها عناصر Y, Ce, Dy, Gd و La آورده شده است. برای محاسبه‌ها و ترسیم نقشه‌ها



شکل ۱. نقشه‌ی زمین‌شناسی آنومالی ۵ ساغند با مقیاس ۱:۲۰۰۰ [۲۳] به همراه موقعیت نقطه‌های نمونه‌برداری لیتوژئوشیمیایی و نمایش محدوده در منطقه‌ی ساختاری ایران.

لایه‌های منبیت ختم می‌شود. در فوقانی‌ترین بخش چرخه‌ی زیرین، لایه‌های بسیار نازک شیل و توف آهن‌دار وجود دارد که حکایت از شرایط رسوب‌گذاری آرام دارد. چرخه‌ی دوم با گدازه‌های حد واسط تا اسیدی (ریولیتی) شروع می‌شود و به تدریج به طبقات کنگلومرای توفی و سپس توف و شیل ختم می‌شود. در فوقانی‌ترین بخش، دو واحد (با ضخامت حدود ۱۰ تا ۲۵ متر) از ماسه‌سنگ کوارتزیتی وجود دارد که افق بین این واحدها از جنس توف و شیل است. در بخش شمالی منطقه‌ی مورد مطالعه، رخنمون نسبتاً وسیعی از توده‌ی متبلور و سفیدرنگ گرانیتوئیدی وجود دارد؛ این واحد سنگی از سمت شرق و جنوب به صورت تدریجی به طبقه‌ها و واحدهای متاسوماتیتی تبدیل می‌شود. توده‌ی گرانیتوئیدی محدوده‌ی مورد مطالعه، هم‌ارز توده‌ی گرانیتی زیرگان در کوه دوزخ‌دره است که به صورت نفوذی‌های نیمه‌عمیق در منطقه قابل مشاهده است و گسترش قابل توجهی دارد. در کوه‌های تاشک و ناتک سنگ‌های دگرگونی تاشک و توده‌های دیوریتی و گرانودیوریتی را یک سری توده‌های گرانیتی قطع نموده‌اند. این توده‌های گرانیتی که تحت عنوان گرانیت زیرگان معرفی شده‌اند [۲۴]، صورتی و سفیدرنگ بوده و عمدتاً از کوارتز و فلدسپات



برخورد با مسایل پیچیده و از طرفی دیگر پیچیدگی‌های موجود در نحوه‌ی مهاجرت عناصر به علل مختلف زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی در مباحث اکتشافات ژئوشیمیایی منجر به استفاده از این روش توسط متخصصین امور اکتشافات معدنی خصوصاً اکتشافات ژئوشیمیایی شد. روش‌های مختلف فرکتالی جداسازی ناهنجاری از زمینه [۷، ۸] عبارت‌اند از: روش عیار- مساحت، روش عیار- محیط، روش طیف توان، روش عیار- فاصله. از روش عیار- مساحت در اکتشافات ژئوشیمیایی برای جداسازی جامعه‌های ناهنجاری از زمینه به عنوان یکی از قوی‌ترین روش‌های شناخته شده برای تعیین حد آستانه با ضریب اطمینان بالا، استفاده می‌شود [۲۹، ۲].

از نرم‌افزار ۱۵ Rockworks استفاده شد. مشخصات آماری اولیه‌ی داده‌های لیتوژئوشیمیایی عناصر، در جدول ۱ آورده شده است.

### ۱.۳ روش فرکتالی عیار- مساحت

با توجه به این که هندسه‌ی اقلیدسی توانایی بیان اکثر پیچیدگی‌های موجود در طبیعت را ندارد، بیان این پیچیدگی‌ها نیازمند هندسه‌ی فرکتالی است. از هندسه‌ی فرکتالی به عنوان هندسه‌ی طبیعت نیز یاد می‌شود [۸]. در واقع بنا به گفته‌ی ماندلبروت، فرکتال‌ها توصیف‌گر طبیعت‌اند، آن طور که طبیعت اعمال می‌کند، نه به گونه‌ای که بشر می‌خواهد و این امتیاز بزرگی محسوب می‌شود. گستردگی این هندسه و توانایی آن در

جدول ۱. مشخصات آماری اولیه‌ی داده‌های لیتوژئوشیمیایی برای عناصر خاکی نادر و اورانیم و توریم

*TLREEs										۱۰۶۱۸-۱۰۴۲۹۸
THREEs										۸۶،۲۲-۶۶۶۳،۳۸
Pr	Nd	Lu	La	Ho	Gd	Eu	Er	Dy	Ce	
۱۲،۲۳	۲۶۰،۶۴	۰،۸۸	۶۶۷،۴۲	۵،۸۸	۲۴،۰۴	۴،۳۹	۳،۵۱	۱۶۵،۳۰	۶۳۶،۰۳	میانگین (ppm)
۵۸،۶۳	۱۳۵۸۱۶،۱۳	۰،۳۷	۴۳۵۵۴،۸۳	۳۲،۶۳	۵۱۵،۳۰	۲۹،۰۹	۱۰،۳۳	۲۵۹۱۶،۲۳	۳۵۳۰۶،۶۳	واریانس
۷،۶۶	۳۶۸،۵۳	۰،۶۱	۶۵۹،۹۶	۵،۷۱	۲۲،۷۰	۵،۳۹	۳،۲۱	۱۶۰،۹۹	۵۹۴،۶۵	انحراف معیار
۳،۷۱	۷،۰۶	۳،۰۵	۳،۴۱	۴،۵۷	۵،۴۰	۷،۵۹	۳،۸۲	۳،۸۸	۳،۲۸	چولگی
۲۰،۵۷	۵۸،۲۱	۱۲،۸۲	۱۶،۴۰	۲۶،۳۷	۳۷،۴۸	۶۵،۳۵	۱۹،۲۴	۱۸،۴۹	۱۴،۰۲	کشیدگی
۳،۶۸	۹،۶۷	۰،۲۸	۳۱،۹۳	۰،۵۳	۴،۶۳	۰،۷۵	۰،۸۰	۶،۳۸	۳۱،۹۵	کمینه
۶۲،۴۴	۳۳۷۹،۳۷	۴،۳۹	۴۷۳۴،۰۰	۴۴،۷۹	۱۹۶،۰۰	۵۱،۳۵	۲۳،۸۹	۱۱۱۳،۰۰	۴۰۹۵،۰۰	بیشینه
۱۰،۸۱	۱۸۸،۴۸	۰،۷۲	۵۲۴،۰۵	۴،۵۰	۱۹،۰۷	۳،۴۰	۲،۸۲	۱۲۰،۴۲	۴۹۸،۲۰	میانه
	U	Yb	Y	Tm	Th	Tb	Sm	Sc		
	۱۳۳،۳۲	۷۲،۰۸	۶۱۸،۹۰	۱،۲۸	۵۴،۷۴	۰،۹۱	۳۵،۱۳	۴۸،۰۳		میانگین (ppm)
	۱۳۸۷۱،۶۹	۴۶۹۲،۰۱	۳۳۸۷۱۱،۹۳	۱،۰۲	۳۶۳۸،۳۸	۰،۲۷	۱۸۶۸،۸۲	۱۱۷۷،۵۲		واریانس
	۱۱۷،۷۸	۶۸،۵۰	۵۸۱،۹۹	۱،۰۱	۶۰،۳۲	۰،۵۲	۴۳،۲۳	۳۴،۳۲		انحراف معیار
	۳،۰۳	۳،۵۹	۳،۴۲	۳،۳۱	۴،۱۱	۱،۹۵	۷،۱۵	۱،۳۷		چولگی
	۱۳،۹۹	۱۷،۸۰	۱۴،۲۹	۱۴،۳۴	۲۲،۲۴	۵،۵۲	۵۹،۸۵	۱،۱۸		کشیدگی
	۱۰،۰۰	۳،۸۶	۳۴،۴۲	۰،۲۹	۱۱،۶۵	۰،۱۶	۳،۲۳	۱۰،۳۱		کمینه
	۹۳۷،۰۰	۵۰۳،۵۵	۳۷۵۵،۰۰	۷،۱۹	۴۵۵،۰۲	۳،۳۲	۴۰۳،۶۱	۱۶۵،۵۲		بیشینه
	۱۱۳،۰۰	۵۷،۵۶	۴۶۵،۳۳	۱،۰۲	۳۵،۷۱	۰،۷۹	۲۷،۲۶	۳۲،۵۸		میانه

\*T=Total



که در آن،  $\chi_q$  تابع تقسیم،  $\varepsilon$  ابعاد ریزبلوک سه‌بُعدی یا سلول دو‌بُعدی و یا به طور کلی جزء مورد اندازه‌گیری، و  $\mu$  پارامتر مورد سنجش در هر جزء است. با رسم منحنی تغییر مساحت در برابر عیار، می‌توان بُعد هر جامعه را از طریق شیب خط برازش شده به داده‌ها حساب نمود. نقطه‌های شکست (تغییر شیب خط برازش شده) در این نمودار، بیان‌گر تغییر یک جامعه به جامعه‌ی دیگر است. اگر تنها یک نقطه‌ی شکست وجود داشته باشد، گفته می‌شود که عنصر موردنظر در محدوده‌ی مورد مطالعه دارای رفتار تک‌فرکتالی است. ولی عموماً، این مسأله به ندرت دیده می‌شود، و معمولاً بیش از دو جامعه‌ی مجزا دیده می‌شود که این مسأله را هالسی و همکاران (۱۹۸۶) [۳۴] و ماندلبروت و اورترز (۱۹۹۲) [۳۳، ۲۴] با عنوان «خاصیت چندفرکتالی داده‌ها [۳۵]» مطرح کردند. چندفرکتالی، یعنی این که منحنی لگاریتمی عیار در برابر مساحت تجمعی، چند نقطه‌ی شکست داشته باشد. بر این اساس، بیش از دو جامعه‌ی مجزا از نظر زمین‌شناسی، ژئوشیمی یا ژئوفیزیک در منطقه‌ی مورد مطالعه، مشاهده خواهد شد [۳۶، ۳۷، ۳۸]. تغییر جامعه‌ها در این روش، تابعی از تغییر شرایط زمین‌شناسی چون کانی‌زایی، دگرسانی‌ها، وضعیت کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، رسوب‌گذاری، زمین‌ساختی و دگرگونی در منطقه است [۳۰، ۳۹]. به طور کلی، این روش دارای برتری‌های بسیاری نسبت به روش‌های با کاربرد مشابه در آمار کلاسیک است. در روش‌های مبتنی بر آمار کلاسیک، داده‌ها مستقل از یک‌دیگر در نظر گرفته می‌شوند و هیچ‌گونه وضعیت زمین‌شناسی داده‌ها در توزیع آن‌ها لحاظ نمی‌شود [۴۰، ۴۱]. هم‌چنین، استفاده از فرمول‌های ریاضی در روش‌های آمار کلاسیک بستگی به بهنجار بودن یا نبودن داده‌ها دارد [۸].

### ۲.۳ جداسازی ناهنجاری عناصر خاکی نادر از زمینه

با توجه به اهمیت لایه‌ی ژئوشیمی، این لایه به عنوان مبنای اکتشاف در این منطقه در نظر گرفته شد [۴۲]؛ در این راستا، داده‌های برداشت شده‌ی لیتوژئوشیمیایی برای عناصر خاکی نادر به روش فرکتالی عیار- مساحت مورد پردازش و تحلیل قرار گرفت. روش کار برای ساختن مدل عیار- مساحت مقدرهای لیتوژئوشیمیایی اندازه‌گیری شده‌ی عناصر خاکی نادر محدوده‌ی

روش عیار- مساحت- که توسط چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۴ ارایه شد [۲]، مبتنی بر مقدار مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه‌ی مورد مطالعه اشغال نموده است. هر چه عیار عنصر افزایش یابد، مقدار مساحت اشغالی توسط آن کاهش می‌یابد. مدل‌سازی‌های فرکتالی مبتنی بر وجود یک مجموعه رابطه بین تابع توانی شاخص  $M(\delta)$  و پارامتر مورد بررسی  $\delta$  در منطقه‌ی مورد مطالعه است

$$M(\delta) \propto \delta^{-\alpha} \quad (1)$$

که در آن، پارامتر  $\alpha$  بُعد فرکتالی در هر نقطه از نمودار لگاریتمی است که با توجه به طبیعت چندفرکتالی داده‌ها در علوم زمین، مقدارهای آن متفاوت است [۸]. این روش برای توضیح رابطه‌ی هم‌بستگی میان نتایج حاصل از اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی، به کار برده می‌شود. مفیدترین ویژگی این روش، راحتی اجرا و توانایی محاسبه‌ی حد آستانه‌های کمی ناهنجاری‌ها است. لذا، برای جداسازی ناهنجاری ژئوشیمیایی از زمینه، با استفاده از حد آستانه در آن ناحیه، به کار می‌رود [۳۰]. روش فرکتالی عیار- مساحت (C-A)، می‌تواند برای توصیف الگوها و دسته‌بندی تصویرها براساس نمودار عیار- مساحت (یک‌بُعدی) مورد استفاده قرار گیرد [۳۰، ۳۱، ۳۲]. فرمول کلی مدل ارایه شده توسط چنگ و همکاران (۱۹۹۴)، این است [۲، ۲۰، ۳۲]

$$A(\rho \leq v) \propto \rho^{-\alpha_1}; \quad A(\rho \geq v) \propto \rho^{-\alpha_2} \quad (2)$$

که در آن  $p$  غلظت عنصر و  $A(p)$  مساحت ناحیه‌های دارای غلظت  $p$ ،  $v$  مقدارهای آستانه و  $a_1$  و  $a_2$  بُعدهای فرکتالی‌اند.

اساس رابطه‌های بالا، تابع تقسیم ارایه شده توسط اورترز و ماندلبروت [۳۳، ۵] در سال ۱۹۹۲ است، که رابطه بین ابعاد یک سلول دو‌بُعدی یا ریزبلوک (جزء) سه‌بُعدی و تعداد آن‌ها و نیز پارامتر اندازه‌گیری شده در آن را بیان می‌کند. رابطه‌ی تابع تقسیم این است

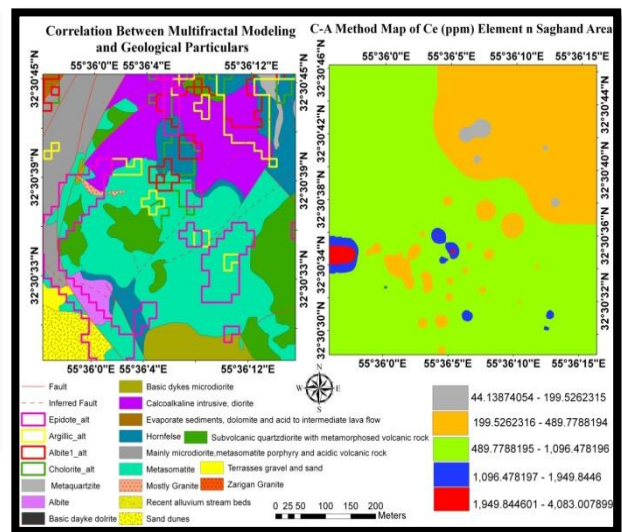
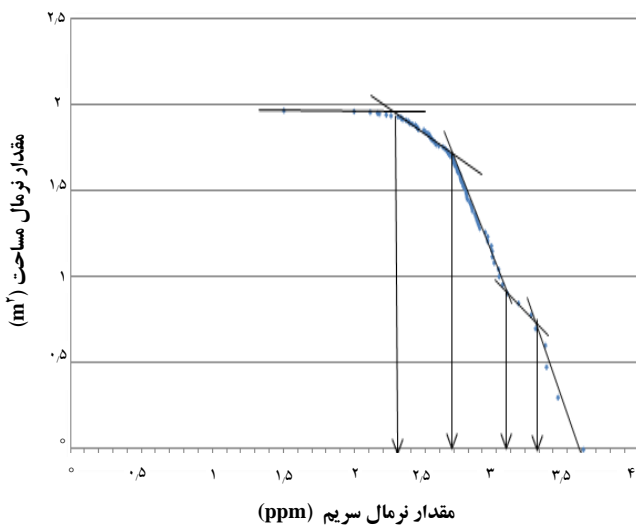
$$\chi_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i^q \quad (3)$$



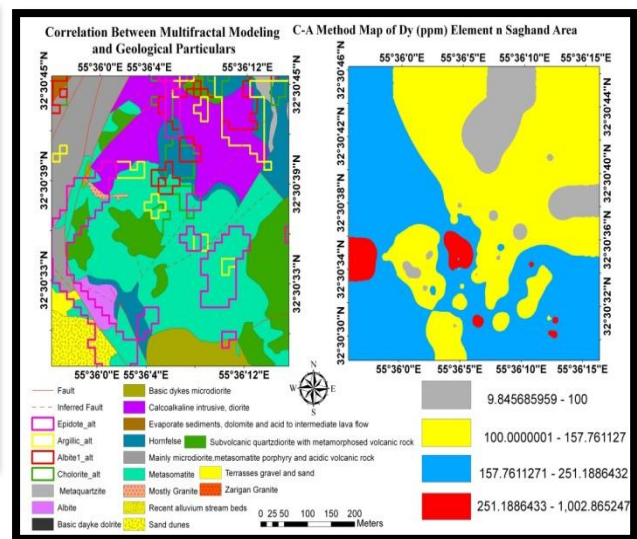
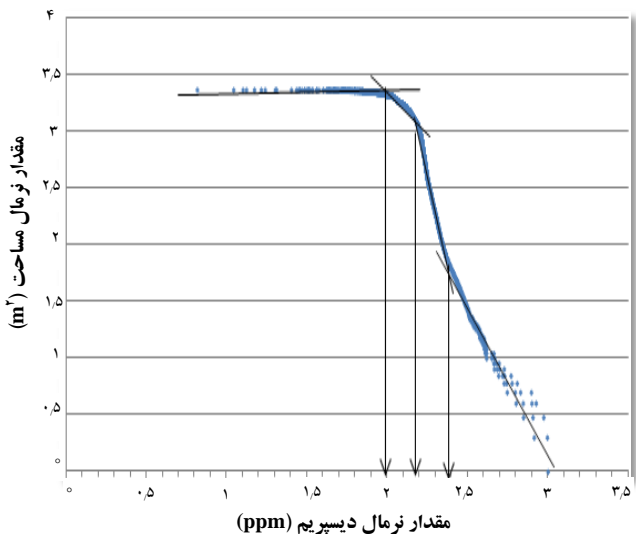
آستانه‌ی ناحیه‌های مختلف کانی‌سازی مدنظر قرار گرفت و نقشه‌ی نهایی ناحیه‌های کانی‌زایی براساس این حدهای آستانه‌ای طبقه‌بندی و تهیه شد. منحنی‌های فرکتالی عیار-مساحت در شکل ۲، الگوی توزیع داده‌های عناصر نادر  $Gd, Y, La, Ce$  و  $Dy$  را به همراه خط‌های برازش شده و نقشه‌های جداسازی جامعه‌های مختلف زمینه و ناهنجاری‌ها، حد آستانه و نقشه‌ی هم‌شدت ناهنجاری‌های این عناصر نشان می‌دهد. بر این اساس مقادیر این عناصر مورد مطالعه در زمینه و در ناهنجاری‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

ساغند بدین صورت بود که، برای دستیابی به الگوی صحیح توزیع منطقه‌ای عناصر خاکی نادر، نقشه‌های هم‌شدت توزیع عناصر در نرم‌افزار Rockworks تهیه و از روی این نقشه‌های هم‌شدت، مساحت محصور به هر عیار محاسبه شد. برای محاسبه‌ی مساحت متناظر با هر عیار ابتدا داده‌ها شبکه‌بندی شدند. در ادامه با توجه به مساحت‌های محاسبه شده برای هر عیار، منحنی عیار-مساحت به صورت تجمعی توسط نرم‌افزار Excel ترسیم و خط‌هایی بر منحنی فرکتالی عیار-مساحت برازش شد. محل تلاقی خط‌های برازش شده به عنوان مرز و حد

(الف)

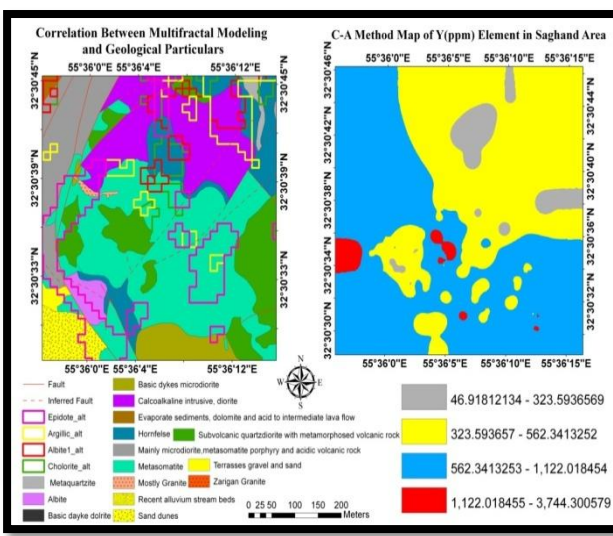
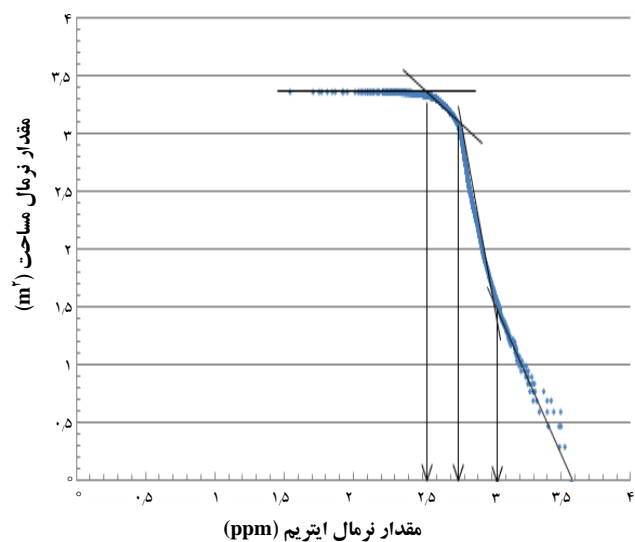
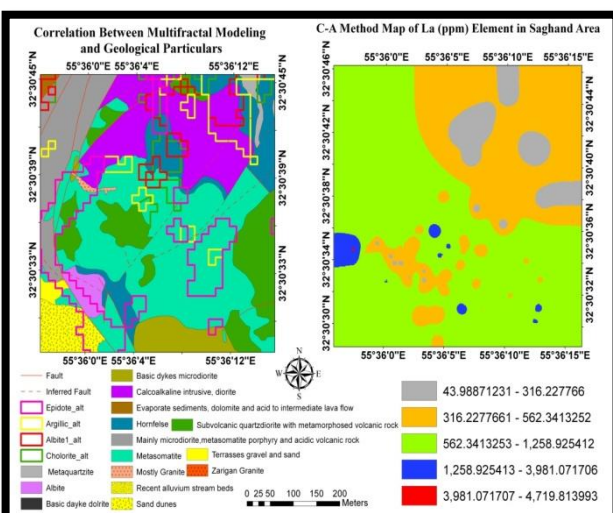
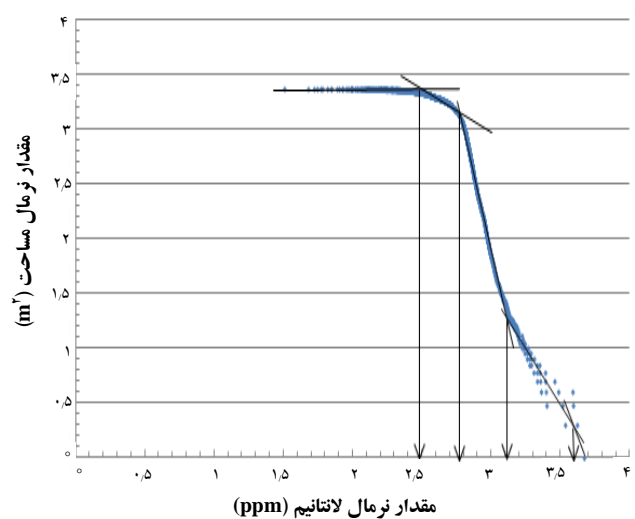
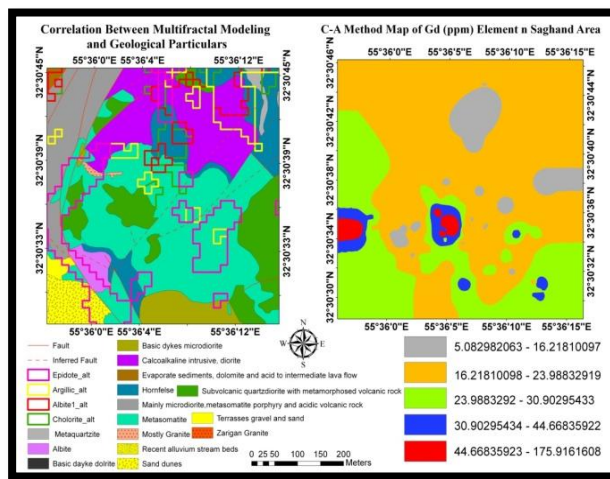
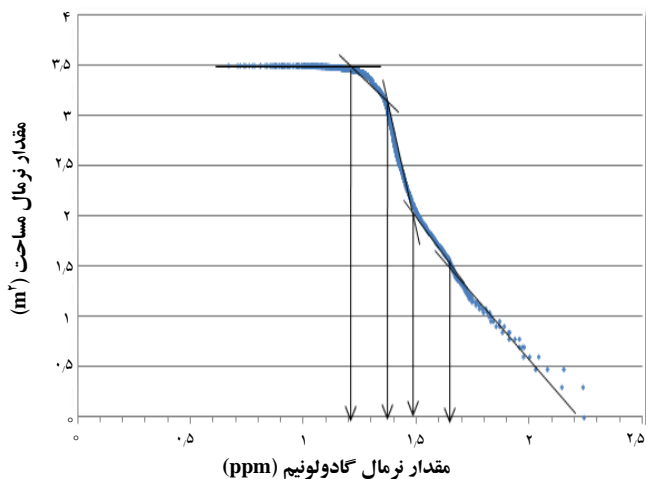


(ب)



شکل ۲. منحنی‌های فرکتالی عیار-مساحت الگوی توزیع داده‌های عناصر نادر، (الف)  $Ce$ ، (ب)  $Dy$ ، (ج)  $Gd$ ، (د)  $La$  و (و)  $Y$ ؛ به همراه خط‌های برازش شده و نقشه‌های جداسازی جامعه‌های مختلف زمینه و ناهنجاری‌های عناصر محدودی ساغند به همراه لایه‌ی زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰.



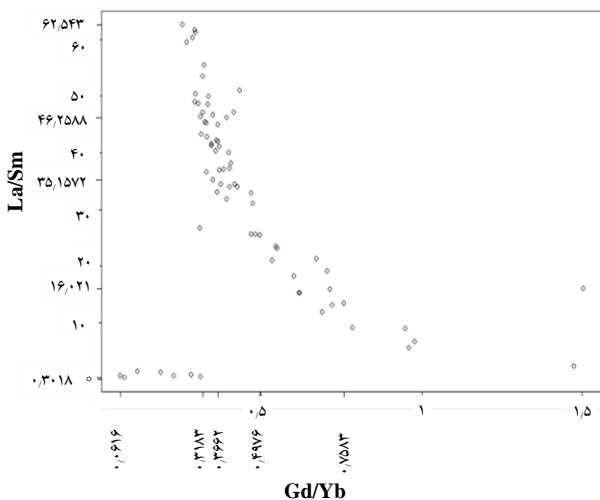


شکل ۲. (ادامه).

**جدول ۲.** مقدار ناهنجاری‌ها و زمینه برای عناصر La، Ce، Y، Gd و Dy در آنومالی ۵ ساغند

عناصر	مقدار زمینه (ppm)	مقدار ناهنجاری (ppm)			
		شدت - کم	شدت - متوسط	شدت - بالا	شدت - خیلی بالا
Ce	< ۱۹۹,۵۲	۱۹۹,۵۲ - ۴۸۹,۷۷	۴۸۹,۷۷ - ۱۰۹۶,۴۷	۱۰۹۶,۴۷ - ۱۹۴۹,۸۴	> ۱۹۴۹,۸۴
Dy	< ۱۰۰	۱۰۰ - ۱۵۷,۷۶	۱۵۷,۷۶ - ۲۵۱,۱۸	> ۲۵۱,۱۸	-
Gd	< ۲۱,۱۶	۱۶,۲۱ - ۲۳,۹۸	۲۳,۹۸ - ۳۰,۹۰	۳۰,۹۰ - ۴۴,۶۶	> ۴۴,۶۶
La	< ۳۱۶,۲۲	۳۱۶,۲۲ - ۵۶۲,۳۴	۵۶۲,۳۴ - ۱۲۵۸,۹۲	۱۲۵۸,۹۲ - ۳۹۸۱,۰۷	> ۳۹۸۱,۰۷
Y	< ۵۹,۳۲۳	۳۲۳,۵۹ - ۵۶۲,۳۴	۵۶۲,۳۴ - ۱۱۲۲,۰۱	> ۱۱۲۲,۰۱	-

آتشفشانی - اسیدی متاسوماتیتی شده بود. محدوده‌ی غرب و جنوب غربی مرتبط با دگرسانی اپیدوتی بود. بخش مرکزی محدوده در واحدهای متاسوماتیت و مرتبط با دگرسانی اپیدوتی و کلریتی و به مقدار کم تر دگرسانی آلپیتی بودند. دیسپرسیم (Dy) در مرکز محدوده و در واحدهای کوارتز دیوریت، در شرق در واحد میکرو دیوریت و در جنوب شرقی در واحد کوارتز دیوریت و دگرسانی اپیدوتی، در جنوب در واحد متاسوماتیت و مرز مشترک با دایک‌های بازیک میکرو دیوریت و مرتبط با آلتراسیون اپیدوتی بود. ایتیریم (Y) در غرب با واحدهای میکرو دیوریت با سنگ‌های آتشفشانی - اسیدی متاسوماتیتی شده بیشترین تمرکز از ناهنجاری‌های این عنصر را نشان داد و مرتبط با دگرسانی اپیدوتی بود. ایتیریم در بخش مرکزی محدوده و در واحدهای متاسوماتیت مرتبط با دگرسانی اپیدوتی و به مقدار کم تر کلریتی بود. مهم‌ترین دگرسانی‌های مرتبط با متاسوماتیت‌ها، دگرسانی کلریتی و اپیدوتی بود که با نتایج بررسی‌های تصویرهای ماهواره‌ای (نتایج حاصل از بررسی‌های دورسنجی و پردازش تصویرهای استر ماهواره‌ی ترا) مطابقت داشتند (شکل ۳).



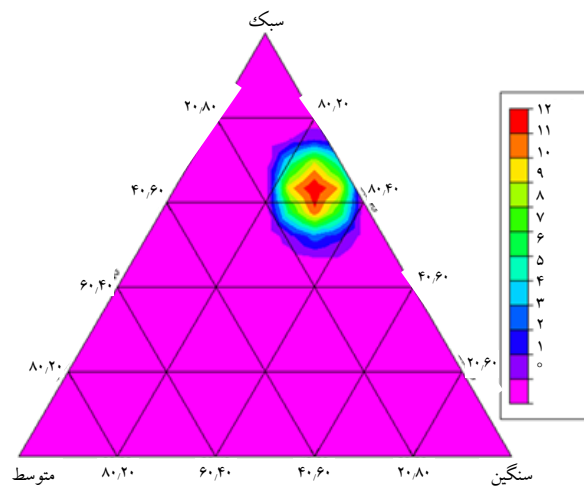
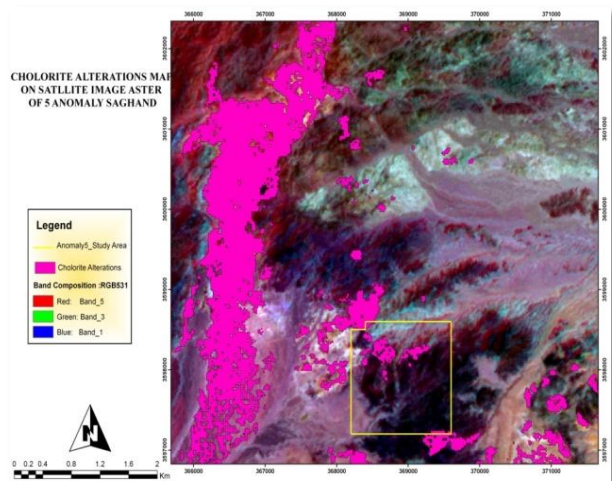
**شکل ۳.** نمودار جعبه‌ای داده‌های بهنجار شده‌ی مقدار (La/Sm) در برابر مقدار (Gd/Yb) (نشان‌دهنده‌ی این که در محدوده‌ی ساغند مقدار عناصر خاکی نادر سبک بیش تر از عناصر خاکی نادر سنگین است [۴۴]).

#### ۴. تطابق نتیجه‌های حاصل از تحلیل فرکتالی داده‌های ژئوشیمیایی با زمین‌شناسی

محدوده‌ی ساغند در ایران مرکزی برای کانی‌سازی عناصر پرتوزا و عناصر همراه به ویژه عناصر خاکی نادر بسیار مهم است. در این محدوده مقدار عناصر خاکی نادر سبک (LREE) بیش تر از عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) بوده [۴۳] (شکل‌های ۳ و ۴) و با روش فرکتالی عیار - مساحت ناهنجاری‌های خوبی برای این عناصر حاصل شد که می‌تواند به عنوان یک لایه‌ی اطلاعاتی مهم در کارهای اکتشافی این عناصر مدنظر قرار گیرد. بقیه‌ی لایه‌های اطلاعاتی نظیر زمین‌شناسی، ساختارها، دگرسانی‌ها (اپیدوتی و کلریتی) (شکل ۵) و پتروگرافی برای عناصر خاکی نادر نیز با داده‌های لیتوژئوشیمیایی هم‌خوانی داشتند (شکل ۲).

ناهنجاری‌های سریم (Ce)، در بخش‌های جنوب غربی در واحدهای آلپیت متاسوماتیت، در غرب در واحدهای میکرو دیوریت و سنگ‌های آتشفشانی - اسیدی متاسوماتیتی شده‌ی مرتبط با دگرسانی اپیدوتی به دست آمد. سریم در بخش مرکزی در واحدهای متاسوماتیت مرتبط با دگرسانی اپیدوتی و کلریتی، و به مقدار کم تر دگرسانی آلپیتی و در واحدهای کوارتز دیوریت‌ها بود. قسمت‌های شرق و جنوب شرقی در کوارتز دیوریت و دگرسانی اپیدوتی بود و جنوب منطقه در واحد متاسوماتیت و مرز مشترک با دایک‌های بازیک میکرو دیوریت و دگرسانی اپیدوتی بیشترین تمرکز را داشتند. نئودیم (Nd) به مانند سریم در بخش‌های مرکزی ناهنجاری خوبی را نشان داد. بیشترین تمرکز لاتتانیوم (La) در بخش‌های جنوب غربی در واحدهای آلپیت متاسوماتیت و در غرب در واحدهای میکرو دیوریت و سنگ‌های آتشفشانی - اسیدی متاسوماتیتی شده‌ی مرتبط با دگرسانی اپیدوتی بود و بخش مرکزی در متاسوماتیت مرتبط با دگرسانی کلریتی (شکل ۶ الف)، اپیدوتی (شکل ۶ ب) و آلپیتی به مقدار کم تر از غرب بود. بیشترین تمرکز گادولینیم (Gd) در بخش‌های جنوب غربی محدوده به مقدار کم در واحدهای آلپیت متاسوماتیت و در غرب بیشترین تمرکز در واحدهای میکرو دیوریت با سنگ‌های

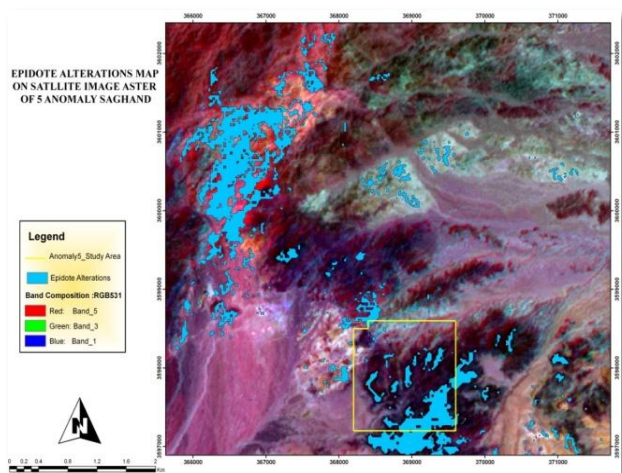
(الف)



شکل ۴. نمایش توزیع داده‌های عناصر خاکی نادر سبک، متوسط و سنگین در آنومالی ۵ ساغند.

(ب)

(الف)



شکل ۶. نتایج حاصل از بررسی تصاویرهای استر ماهواره‌ای ترا برای (الف) دگرسانی‌های کلریتی، (ب) اپیدوتی.



(ب)

### ۵. نتیجه‌گیری

محدوده‌ی آنومالی ۵ ساغند ظرفیت خوبی از عناصر پرتوزای اورانیم و توریم دارد و با توجه به هم‌بستگی و رابطه‌ی مثبتی که بین این عناصر با عناصر خاکی نادر وجود دارد، عناصر خاکی نادر به صورت جانشین در کانی‌های اورانیم‌دار یافت می‌شوند و این محدوده می‌تواند به عنوان یک ذخیره‌ی عناصر خاکی نادر در متاسوماتیت‌ها معرفی شود. جداسازی ناهنجاری‌های عناصر خاکی نادر از زمینه با استفاده از داده‌های لیتوژئوشیمیایی و روش فرکتالی عیار- مساحت انجام شد. این عناصر ناهنجاری مناسبی را به ترتیب اولویت در بخش غرب و جنوب‌غربی، مرکزی و بخش بزرگی از نیمه‌ی جنوبی منطقه نشان داد. بالاترین میزان عیار



شکل ۵. (الف) واحد زمین‌شناسی آلپیت متاسوماتیت با پرتوزایی بالا که حاوی عناصر خاکی نادر بالایی در کانی‌های اورانیم‌دار به صورت جای‌گزینی است، (ب) آمفیبول متاسوماتیت.



## مرجع‌ها

- [1] A. Khakzad, Metallogeny and exploration of rare metals, Pelk Publication, (2009) 215.
- [2] Q. Cheng, F.P. Agterberg, S.B. Ballantyne, The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods, *Journal of Geochemical Exploration*, 51 (1994) 109-130.
- [3] Davis, C. John, Statistics and data analysis in geology, 3th ed. John Wiley & Sons Inc, New York (2002).
- [4] C. Li, T. Ma, J. Shi, Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background, *Journal of Geochemical Exploration*, 77 (2003) 167-175.
- [5] B.B. Mandelbrot, The fractal geometry of nature (update and augmented edition), Freeman, New York (1983) 468.
- [6] B. Bolviken, P.R. Stokke, J. Feder, T. Jossang, The fractal nature of geochemical landscapes, *Journal of Geochemical Exploration*, 43 (1992) 91-109.
- [7] P. Afzal, A. Khakzad, P. Moarefvand, N. Rashidnejad Omran, B. Esfandiari, Y. Fadakar Alghalandis, Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran, *Journal of Geochemical Exploration*, 104 (2010) 34-46.
- [8] P. Afzal, Y. FadakarAlghalandis, A. Khakzad, P. Moarefvand, N. Rashidnejad Omran, Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling, *Journal of Geochemical Exploration*, 108 (2011) 220-232.
- [9] Z. Wang, Q. Cheng, D. Xu, Y. Dong, Fractal modeling of sphalerite banding in jinding Pb-Zn deposit, Yunnan, Southwestern China, *Journal of China University of Geosciences*, 19 (1) (2008) 77-84.
- [10] E.J.M. Carranza, Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS, *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, 11 (2008) 351.

عناصر پرتوزا (اورانیم و توریم) در بخش غربی و جنوب غربی در واحدهای سنگی متاسوماتیتی محدوده بود که بیشترین ناهنجاری‌های به دست آمده از عناصر خاکی نادر (La, Y, Ce, Gd و Dy) منطبق با پرتوزایی بالای عناصر پرتوزا بود. دگرسانی اپیدوتی حاصل از پردازش تصویرهای ماهواره‌ای و چک‌های صحرائی هم‌پوشانی خوبی با ناهنجاری‌های بخش غرب و جنوب غربی محدوده داشت، در حالی که، دگرسانی کلریتی و بخشی از دگرسانی آلپینی در بخش مرکزی منطبق با ناهنجاری‌های این عناصر بودند. بخش بزرگی از نیمه‌ی جنوبی منطقه جزو منطقه‌های ناهنجان و منطبق بر روند گسل‌ها بوده و در مجاورت گسل‌ها تمرکز یافته بود. در منطقه‌ی مورد مطالعه، پدیده‌ی متاسوماتیسم حالتی پیش‌رونده داشته که سنگ‌های اولیه منطقه (سنگ‌های آذرآواری، گدازه‌های بازی و اسیدی) را به سنگ‌های مختلف اعم از آلپیت متاسوماتیت (شکل ۵ الف)، آمفیبول-آلپیت متاسوماتیت، آمفیبول متاسوماتیت (شکل ۵ ب) و کربنات متاسوماتیت تبدیل کرده است. ماگماتیسم قلیایی سبب پدیده‌ی متاسوماتیسم و ایجاد انواع واحدهای سنگی بوده و محلول‌های همراه، که غنی از سدیم و کربنات بوده، توانسته است عناصر فلزی را از سنگ‌های میزبان (در آنومالی پنج، سنگ‌های آذرآواری، دیابازها، گرانیت‌ها و گابروها) سر راه خود آزاد و با خود حمل نموده و به فراخور شرایط ژئوشیمیایی در میدان پایدار، هر یک را به طور مستقل بر جای گذارد.

## تشکر و قدردانی

نگارندگان، از ریاست محترم پژوهشکده‌ی چرخه سوخت هسته‌ای سازمان انرژی اتمی، جناب آقای مهندس کتابداری و بخش اکتشاف که شرایط انجام نمونه‌برداری، تجزیه و پژوهش و انجام رساله‌ی دکترا را در آن مجموعه فراهم نمودند، نهایت قدردانی و تشکر را دارند. هم‌چنین از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، که تجزیه‌های (ICP-OES) مرتبط با عناصر پرتوزا و عناصر خاکی نادر را انجام دادند، کمال تشکر را دارند.



- [11] E.J.M. Carranza, E. Owusu, M. Hale, Mapping of prospectivity and estimation of number of undiscovered prospects for lode-gold, Southwestern Ashanti Belt, Ghana, *Mineralium Deposita*, 44 (8) (2009) 915-938.
- [12] B. Sadeghi, P. Moarefvand, P. Afzal, A.B. Yasrebi, L. Daneshvar Saevin, Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran. *J Geochem Explor*, 122 (2012) 9–19.
- [13] S. Hassanpour, P. Afzal, Application of concentration-number (CN) multifractal modelling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran. *Arab J Geosci* 6 (2013) 957–970. doi:10.1007/s12517-011-0396-2.
- [14] S.M. Heidari, M. Ghaderi, P. Afzal, Delineating mineralized phases based on litho-geochemical data using multifractal model in Touzlar epithermal Au-Ag (Cu) deposit, NW Iran., *Appl Geochem*, 31 (2013) 119–132.
- [15] A. Nazarpour, N.R. Omran, G.R. Paydar, Application of multifractal models to identify geochemical anomalies in Zarshuran Au deposit, NW Iran. *Arab J Geosci*, (2013) 1–13, doi: 10.1007/s12517-013-1183-z.
- [16] P. Afzal, Dimensional fractal methods for the separation zones of porphyry deposits, Science and Research Branch, Islamic Azad University (IAU), Tehran, Iran, (2010).
- [17] D.L. Turcotte, A fractal approach to the relationship between ore grade and tonnage, *Economic Geology*, 18 (1986) 1525–1532.
- [18] X. Meng, P. Zhao, Fractal method for statistical analysis of geological data, *Chinese Journal of Geosciences*, 2 (1991) 207-211.
- [19] F.P. Agterberg, Calculation of the variance of mean values for blocks in regional resource evaluation studies, *Nonrenewable Resources*, 2 (1993) 312–324.
- [20] Z. Mao, S. Peng, J. Lai, Y. Shao, B. Yang, Fractal study of geochemical prospecting data in south area of Fenghuanshan copper deposit, Tongling Anhui. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 26 (4) (2004) 11–14.
- [21] Zuo, Renguang, Cheng, Qiuming, Xia, Qinglin, Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration, *Journal of Geochemical Exploration*, 102(1) (2009) 37-43.
- [22] B. Samani, Y. Talezadeh Lari, Report of the first phase of uranium exploration project in Saghand area, Report No 225 (1988).
- [23] B. Samani, Phenomena of Geology and mineralogy of uranium in Saghand (Central Iran), Report of Atomic Energy Organization, Exploration Site, No 220.
- [24] Haghypour, Petrology and tectonic activity of the pre-cambrian sediments of Biabanak and Bafgh regions of Central Iran, *Geol. Surv. Iran.*, Rep. 34 (1974) 403.
- [25] J. Ramezani, R.D. Tucker, The Saghand Region, Central Iran: U-Pb Geochronology, Petrogenesis and Implications for Gondwana Tectonics, *American Journal of Science*, 303 (1995) 622-655.
- [26] J. Ramezani, R.D. Tucker, The saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for gondwana tectonics, *Journal of Science*, 303 (2003) 622-665.
- [27] B. Samani, Metallogeny of the Precambrian in Iran, *Precambrian Research*, 39 (1988) 85-106.
- [28] B. Samani, Metallogeny of rare earth element in metallogenic cycle Pan African Central Iran, 20 (1378) 15-21.
- [29] Q. Cheng, Multifractal theory and geochemical element distribution pattern, *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 25 (3) (2000) 311–318.
- [30] Q. Cheng, Quantifying the generalized self-similarity of spatial patterns for mineral resources assessment, *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 29 (6) (2004) 733-743.
- [31] Q. Cheng, Singularity-generalized self-similarity-fractal spectrum (3S) models, *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 31 (3) (2006) 337–348.



- [32] Q. Cheng, GIS-Based multifractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits, In: Harris, J., ed., GIS Applications in Earth Sciences, Geological Association of Canada Special Paper, (2006a) 289-300.
- [33] C.J.G. Evertz, B.B. Mandelbrot, Multifractal measures, Appendix B in: H.-O. Peitgen, H. Jurgens and D. Saupe, Chaos and Fractals, Springer-Verlag, New York, (1992) 922-953.
- [34] T.C. Halsey, M.H. Jensen, L.P. Kadanoff, I. Procaccia, B.I. Shraiman, Fractal measures and their singularities: the characterization of strange sets, Phys Rev A, 33 (1986) 1141-1151.
- [35] R. Zuo, E.J.M. Carranza, Q. Cheng, Fractal/multifractal modelling of geochemic exploration data, Journal of Geochemical Exploration, 122 (2012) 1-3.
- [36] H. Jafari, Uranium anomalies introducing in Deh Seyahan in 1:250000 Sirjan, land and resources journal (Lahijan), 1 (2009).
- [37] J.R. Harris, L. Wilkinson, E. Grunsky, K. Heather, J. Ayer, Techniques for analysis and visualization of lithochemical data with applications to the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Journal of Geochemical Exploration, 67 (1999) 301-334.
- [38] J.P. Chiles, Fractal and geostatistical methods for modeling of a fracture network, Math. Geol., 20 (1988) 631-654.
- [39] G.F. Bonham-Carter, F.P. Agterberg, D.F. Wright, Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia, Photogramm. Remote sensing, 54 (1988) 1585-1592.
- [40] A.A. Hasanipak, M. Sharafodin, Exploratory data analysis, Tehran University, (1384) 987.
- [41] A.A. Hasanipak, Geostatistic, Tehran University, Third Edition, (1392) 328.
- [42] A. Ziazarifi, Regional exploration of uranium in 1:50000 Tark and Onligh (East Azarbayegan), phd thesis, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Chapter III (2008).
- [43] A. Memar Kuche Bagh, Mineralogy and Petrochemistry of a part of Saghand Area central Iran, Department of Geology St. XAVIER S College Bombay (1991).
- [44] N. Nakamura, Determination of REE, Ba, Mg, Na, and K in carbonaceous and ordinary chondrites, Geochimica et Cosmochimica Acta, 38 (1974) 757-775.