

بررسی نقش توزیع فرکتالی سیلیس در تحولات بافتی و کانه‌زایی طلا در منطقه رامند (استان قزوین)

سید رضا مهرنیا^(۱)

۱. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۰۵

چکیده

منطقه اکتشافی رامند بخشی از نوار ماگمایی ارومیه-دختر است که به دلیل قرار گرفتن در ناحیه اثر گسل‌های متقاطع و رخنمون میزبان‌های ریولیتی و ریوداسیتی پالئوژن، تحت تاثیر سیالات ماگمایی قرار گرفته و نشانه‌های بارز کانه‌زایی هیدروترمال در آن مشاهده می‌شود. گوناگونی کانی‌های رسی، کانی‌های خانواده سیلیس و دگرسانی ناشی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، از مظاهر فعالیت‌های پسا ماگمایی در منطقه رامند می‌باشند که در نواحی خرد شده، موجب توسعه رگه‌های معدنی شده است. تمرکز اغلب هاله‌های دگرسانی در اطراف توده‌های آتشفشانی بوده و در رگه‌های کوارتز کلسدونی، ناحیه‌بندی بافتی متنوعی به تبعیت از الگوی بافتی ذخایر اپی‌ترمال مشاهده می‌شود. روش ارائه شده در این تحقیق مبتنی بر مطالعه تحولات بافتی در رگه‌های کوارتز-پیریتی منطقه رامند است که با استفاده از تابع فرکتال عیار-مساحت، امکان شناسایی مناطق امیدبخش معدنی و ارائه نقشه پیش‌داوری با اولویت اکتشاف طلا را فراهم کرده است. به صورت یک قاعده کلی، در رگه‌های سیلیسی با بافت‌های خودساماندهی شده (مانند کوارتز نواری)، محتوای فلزات گرانبها بیشتر از رگه‌هایی است که بافت شیشه‌ای دارند (ویتروفیریک). علت آن، مزیت غنی‌شدگی گام به گام در محیط‌های درونزاد منسوب به ذخایر اپی‌ترمال است. نمونه‌برداری لیتوژئوشیمیایی منطقه پیش از بررسی تحولات بافتی آن انجام شده و از روش‌های آنالیز دستگامی و میکروگرافی رگه‌ها به منظور بررسی تغییرات عیار طلا و تحولات بافتی کانی‌های سیلیس استفاده گردیده است. بر اساس نتایج این تحقیق، توزیع غیرخطی سیلیس (SiO_2) و تحولات بافتی آن در رخساره کوارتز هماتیت نواری (با عیار طلای ۸۲۰ میلی‌گرم بر تن) مشاهده می‌شود، که رخنمون‌های اصلی آن در غرب منطقه رامند قرار داشته و جهت ادامه فعالیت‌های اکتشافی فاز تفصیلی معرفی شده‌اند.

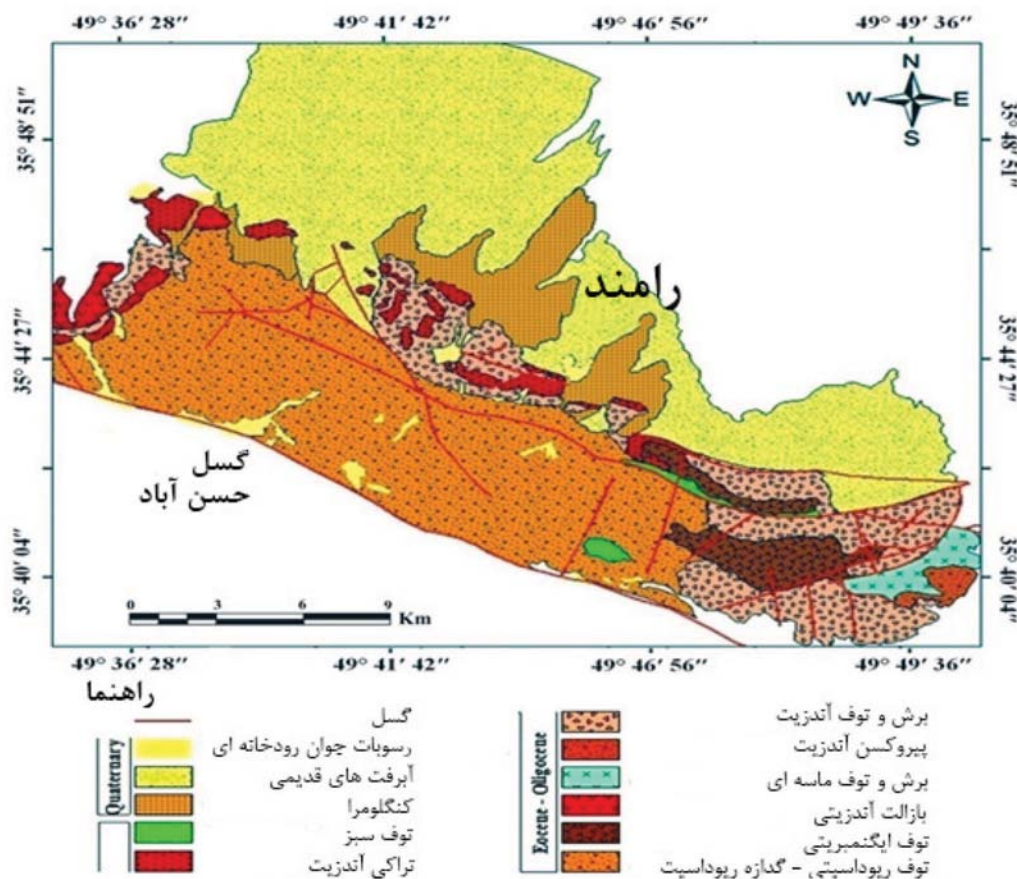
واژه‌های کلیدی: تحول بافتی، توزیع سیلیس، فرکتال، رامند، کانی‌زایی طلا.

مقدمه

شده و ناحیه‌ای به وسعت ۷۰ کیلومتر مربع، متشکل از سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی پالئوژن، تحت تاثیر دگرسانی گرمایی قرار گرفته است (آقانباتی، ۱۳۸۳). توف‌های ریولیتی و ریوداسیتی رامند، مهم‌ترین رخنمون‌های آتشفشانی سنوزوئیک هستند که در محل تلاقی گسل‌ها، میزبان رگه‌های معدنی با ترکیبی از کانی‌های سیلیس، پیریت و آرسنوپیریت می‌باشند.

کوه رامند به عنوان بخشی از گستره زمین ساختاری ایران مرکزی، در جنوب غربی شهرستان بوئین‌زهرا و در فاصله ۶۰ کیلومتری از مرکز استان قزوین قرار گرفته است. شکل ۱، سازندهای زمین‌شناسی منطقه را بر اساس مندرجات نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ دانشفهان نشان می‌دهد. رویدادهای پسا ماگمایی سنوزوئیک، موجب تنوع رخساره‌های سنگی این منطقه

* نویسنده مرتبط: r_mehmiya@pnu.ac.ir



شکل ۱. واحدهای زمین‌شناسی، مناطق دگرسانی و ساختمان‌های گسلی مرتبط با کانه‌زایی طلا در ناحیه رامند قزوین (برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ دانشفهان).

شکل ۱. واحدهای زمین‌شناسی، مناطق دگرسانی و ساختمان‌های گسلی مرتبط با کانه‌زایی طلا در ناحیه رامند قزوین (برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ دانشفهان)

و ریوداسیتی دگرسان شده می‌باشد (Ezzati et al., 2015). معمولاً توزیع نامتعارف کنترل‌کننده‌های گسلی، احتمال تجمع ذخایر فلزی را کاهش می‌دهد (حسنی پاک، ۱۳۸۷). لذا رهیافت اکتشافی این تحقیق مبتنی بر مطالعه الگوی تحولات بافتی سیلیس می‌باشد که برای اولین بار و مستقل از نتایج معیارهای ژئوشیمیایی، سازوکار تمرکز طلا را در نمونه‌های به‌دست‌آمده از رگه‌های کوارتز-پیریتی رامند بررسی کرده است.

طبق سوابق اکتشافی منطقه رامند، از تصاویر سنجنده ETM برای شناسایی و تفکیک واحدهای دگرسانی استفاده شده است (Ezzati et al., 2015). در شکل ۲، سازندهای رسی آغشته به ترکیبات اکسیدی و هیدروکسیدی آهن به رنگ زرد مایل به نارنجی مشخص شده‌اند. این رخنمون‌ها

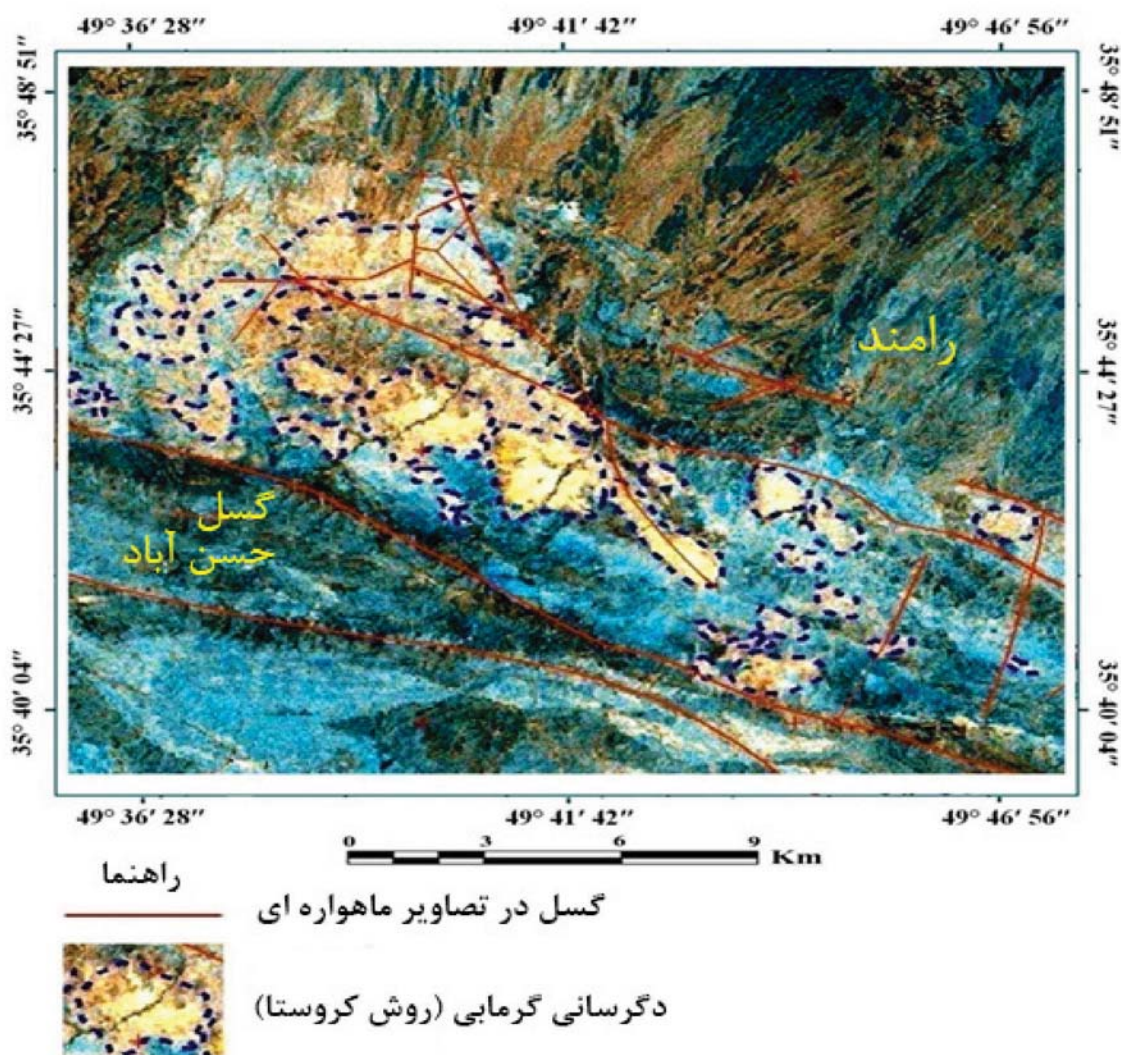
تنوع و شدت هاله‌های دگرسانی، تابعی از مولفه‌های ساختمانی و تغییرات ژئوشیمیایی سیال کانه‌دار است که بر اساس شواهد دورسنجی و نتایج آنالیزهای دستگاهی، شامل کانی‌های رسی (کائولینیت و مونت‌موریلونیت) با ناحیه‌بندی منظم است (Ezzati et al., 2015).

در سامانه‌های اپی‌ترمال، همیافتی کوارتز-پیریت به‌عنوان ملاکی برای غنی‌شدگی اولیه طلا قلمداد می‌شود (Hedenquist et al., 2009)، بنابراین هدف اصلی تحقیق، دستیابی به الگوی توزیع غیرخطی در رگه‌های سیلیسی و بررسی رابطه آنها با افزایش عیار طلا در کوارتزهای نواری شکل منطقه رامند است. تاکنون بی‌جویی‌های متعددی در این منطقه صورت گرفته که نتایج مقدماتی آن موید غنی‌شدگی جزئی طلا (۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌گرم در تن) در واحدهای ریولیتی

سید رضا مهرنیا

در مرکز دگرسانی‌های رسی و اکسیدهای آهن قرار دارد. بنابراین احتمال شکل‌گیری رگه معدنی در بخش‌های درونی این سامانه بیشتر از حواشی آن است و احتمال آن‌که عیار طلا با افزایش محتوای کانی‌های سیلیس، رابطه مستقیم داشته باشد، وجود دارد.

در محل تلاقی گسل‌ها قرار دارد و شامل توف‌های ریولیتی و ریوداسیتی پالئوژن است. در تصاویر ماهواره‌ای، محل رگه‌های کانه‌دار قابل شناسایی نیست، اما موقعیت واحدهای سیلیسی (رخنمون کلاhek سیلیسی) با توجه به نتایج تحلیل طیفی کروستا (Crosta and Moore, 1989)،



شکل ۲. عکس نقشه سنجنده ETM از توزیع مناطق دگرسانی رامند. در این تصویر با استفاده از روش کروستا، امکان تفکیک دگرسانی‌های گرمابی بر اساس تغییرات طیفی آنها در محدوده زرد تا نارنجی روشن فراهم شده است

فاقد رگه‌های معدنی هستند، اما با نزدیک شدن به کلاhek سیلیسی، بر تعداد رگه‌های کوارتز-پیریتی افزوده شده و عیار طلا به‌طور نسبی افزایش می‌یابد (۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌گرم بر تن).

شکل ۳، دورنمایی از کلاhek سیلیسی منطقه رامند را در بخش فوقانی واحدهای توفی و دگرسان شده پالئوژن (متشکل از رس‌ها و هیدروکسیدهای آهن) نشان می‌دهد. بر اساس شواهد صحرایی، رخنمون‌های رسی این منطقه،



شکل ۳. دورنمایی از آثار دگرسانی رسی (مونتموریلونیت و کائولینیت) که در همیافتی با هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، لیمونیت) در منطقه رامند مشاهده می‌گردند (دید به سمت شمال است)

برداشت‌های ژئوشیمیایی به صورت پیمایش‌های سطحی نامنظم و با هدف دستیابی به ملاک‌های متناسب با ذخایر گرمایی صورت گرفتند. دوازده نمونه حاوی کانی‌های سیلیس از منطقه‌ای به وسعت ۱۸ کیلومتر مربع برداشت شد (Ezzati et al., 2015). جدول ۱، نتایج تغییرات کمی سیلیس و طلا را بر اساس سنجش‌های به عمل آمده به روش رونتگن و طیف‌سنج جرمی نشان داده است. افزایش محتوای سیلیس رگه‌ها متناسب با شکل‌گیری کانی‌های کوارتز بوده و کاهش نسبی آن با وفور کانی‌های رسی در ارتباط است.

کانه‌های فلزی این مناطق شامل پیریت، آرسنوپیریت و هماتیت است که در برخی از مقاطع به همراه گالن و اسفالریت مشاهده می‌شوند. این توالی توسط رگه‌های کوارتز شیری، کوارتز دودی، کلسدون و کلسیت میزبانی می‌شود. لازم به ذکر است که پدیده سیلیسی شدن، متأثر از تحولات بافتی مشخصی است که معمولاً با پیدایش کانی‌های بی‌شکل (آمورف) آغاز شده و در ادامه منجر به شکل‌گیری کوارتزهای ریز بلور، کوارتزهای نواری و کلوفرمی می‌شود. با توجه به روند تحولات بافتی منطقه رامند، دستیابی به الگوی توزیع غیرخطی سیلیس، رهیافت مناسبی برای تشخیص مکان هندسی رگه‌های طلا دار این منطقه خواهد بود.

جدول ۱. تغییرات کمی سیلیس (درصد) و طلا (میلی‌گرم بر تن) در محدوده پوش سنگ سیلیسی و بخش فوقانی دگرسانی رسی منطقه رامند

مناطق امیدبخش	مختصات (درجه)		درصد سیلیس	کمیت‌ها عیار طلا (میلی‌گرم در تن)
	طول	عرض		
A	۴۹ ۳۹ ۴۸	۳۵ ۴۴ ۴۰	۵۸/۹	۱۱
	۴۹ ۳۹ ۵۵	۳۵ ۴۴ ۲۴	۶۱/۲	۵۸
	۴۹ ۴۰ ۰۸	۳۵ ۴۴ ۵۱	۶۴/۰	۴۰
	۴۹ ۴۰ ۳۳	۳۵ ۴۵ ۰۲	۷۲/۰	۴۶
	۴۹ ۴۱ ۱۵	۳۵ ۴۴ ۲۹	۷۳/۵	۱۰۸
	۴۹ ۴۱ ۴۴	۳۵ ۴۳ ۴۹	۷۲/۶	۷۹
	۴۹ ۳۶ ۵۸	۳۵ ۴۱ ۵۹	۸۰/۲	۱۱۵
B	۴۹ ۳۷ ۰۷	۳۵ ۴۲ ۱۹	۸۱/۰	۱۰۸
	۴۹ ۳۷ ۱۱	۳۵ ۴۲ ۵۹	۷۱/۲	۹۲
	۴۹ ۳۷ ۲۴	۳۵ ۴۲ ۰۰	۶۹/۶	۴۰
	۴۹ ۳۸ ۰۳	۳۵ ۴۲ ۳۴	۸۳/۸	۱۹۹
	۴۹ ۳۸ ۳۷	۳۵ ۴۲ ۰۹	۸۴/۲	۱۷۷

سید رضا مهرنیا

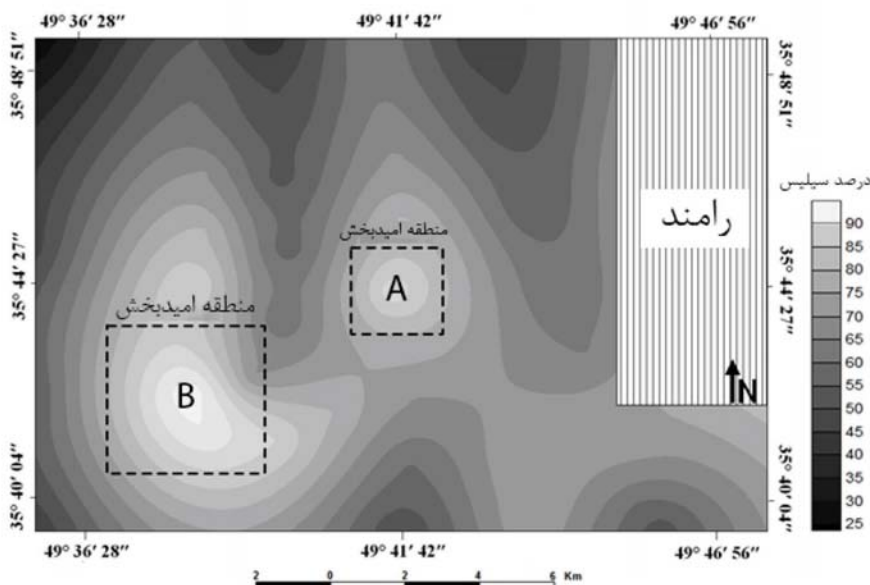
سنجش‌های دستگاهی و مطالعات کانه‌نگاری، پیشنهادها لازم برای شناسایی مناطق امیدبخش معدنی (حاوی طلا) ارائه شده‌اند.

روش تحقیق

تحقیق حاضر بر اساس درون‌یابی تغییرات کمی سیلیس در محیط GIS انجام شده است. در این روش، با استفاده از سامانه تحلیل‌گر مکانی، مقادیر سیلیس (بر حسب درصد)، در قالب فایل‌های شبکه، درون‌یابی شده و نقشه خطوط پربندی مطابق شکل ۴ به دست آمده است. پیش فرض تحلیل‌گر مکانی برای رده‌بندی دامنه تغییرات سیلیس، ۹ رده است که به منظور مشاهده جزئیات دقیق‌تر تا ۱۱ رده ارتقاء یافته است. برای درون‌یابی سیلیس از روش وزن‌دهی در فواصل معکوس استفاده شد که از دیدگاه زمین‌آماري، قابل مقایسه با روش کریجینگ است (Turcotte, 1997).

از آنجا که در خلال مطالعات صحرایی، رابطه مکانی معناداری بین توزیع رگه‌های معدنی و سازوکار تجمع ژئوشیمیایی ترکیبات فلزی مشاهده نشد (Ezzati et al., 2015) لذا از ارتباط تحولات بافتی کانی‌های سیلیس با تمرکز ترجیحی طلا در ذخایر اپی ترمال استفاده شده (Morison and Guoyi, 2001) و مکان هندسی کوارتزه‌های نواری به منظور شناسایی مناطق مستعد معدنی تعیین شده‌اند. بدین ترتیب ضمن بازنگری در پایگاه داده‌های ژئوشیمیایی منطقه رامند، امکان تقریب ضرایب همبستگی داده‌ها با استفاده از خواص کمیت‌های متناظر و تغییرات بعد فرکتالی آنها فراهم شده است.

در جدول ۱، تغییرات کمی سیلیس و عیار طلا درج شده که در ذیل محاسبات این تحقیق، برخی از معیارهای ژئوفرکتالی به منظور ادامه فعالیت‌های اکتشافی منطقه رامند استنتاج شده‌اند. بدین ترتیب پس از نمونه‌برداری،



شکل ۴. درون‌یابی تغییرات کمی سیلیس (بر حسب درصد) به روش وزن‌دهی در فواصل معکوس، منطقه رامند قزوین (مرجع داده‌ها: جدول ۱)

لازم، امکان دستیابی به تابع چگالی فرکتال (معادله عیار-مساحت) مطابق رابطه زیر فراهم می‌شود (مهرنیا، ۱۳۹۲).

$$\text{Log Area (SiO}_2\%) = \text{FD} \cdot \text{Log (SiO}_2\%) \quad (1)$$

در رابطه ۱، منظور از جمله $\text{Log Area (SiO}_2\%)$ ، لگاریتم سطح زیر توزیع سیلیس است که نسبت آن با

در مرحله بعد، عملیات رده‌بندی مجدد بر روی فایل شبکه اعمال شد که طی آن با استفاده از دامنه تغییرات صحیح و طبیعی سیلیس، آماره‌های مرتبط با توزیع سیلیس مطابق جدول ۲ به دست آمده‌اند. سطح زیر توزیع و میانگین تغییرات کمی سیلیس، دو شاخص مستخرج از جدول مذکور هستند که پس از ورود به نرم‌افزار Excel و انجام محاسبات

لگاریتم تغییرات کمی سیلیس ($\text{SiO}_2/\%$) از نوع خطی است. منظور از FD، ضریب زاویه خط است که به عنوان بعد فرکتال منظور می‌شود. برای حالتی که تغییرات بعد قابل اغماض است، با توزیع سیلیس در یک جامعه متناظر

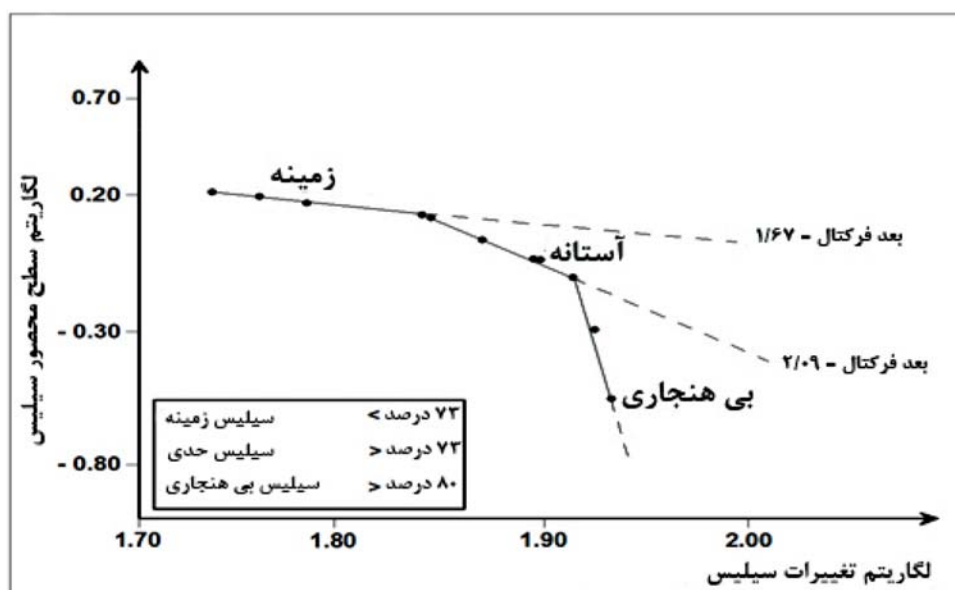
مواجه هستیم. اما در اغلب موارد، توزیع کمیت‌های متناظر محدود به یک جامعه نبوده و شاهد تغییرات بعد فرکتال در جوامع مختلف هستیم (Turcotte, 1997).

جدول ۲. معرفی شاخص‌های کمی و هندسی تغییرات سیلیس برای دستیابی به معادله عیار-مساحت در منطقه رامند قزوین (مرجع داده‌ها: جدول ۱)

جمعیت	ناحیه‌بندی مکانی سیلیس		متغیرهای مکانی محاسبه شده		
	مساحت (کیلومتر مربع)	عیار (درصد)	سطح تجمعی (کیلومتر مربع)	لگاریتم سطح تجمعی	لگاریتم غلظت
حد زمينه	۰/۱۱	۵۸/۸	۱/۸۱	۰/۲۵۷	۱/۷۶
	۰/۰۹	۶۰/۷	۱/۷۰	۰/۲۳۰	۱/۷۸
	۰/۰۵	۶۲/۰	۱/۶۱	۰/۲۰۶	۱/۷۹
	۰/۰۵	۷۱/۳	۱/۵۶	۰/۱۹۳	۱/۸۵
	۰/۰۸	۷۲/۱	۱/۵۱	۰/۱۷۹	۱/۸۵
	۰/۲۱	۷۷/۷	۱/۴۳	۰/۱۵۵	۱/۸۸
حدود آستانه و بی‌هنجاری	۰/۲۷	۷۹/۲	۱/۲۲	۰/۰۸۶	۱/۸۹
	۰/۱۸	۷۹/۹	۰/۹۵	-۰/۰۲۲	۱/۹۰
	۰/۳۳	۸۰/۸	۰/۷۷	-۰/۱۱۳	۱/۹۱
	۰/۲۴	۸۲/۷	۰/۴۴	-۰/۳۵۶	۱/۹۲
	۰/۲۰	۸۴/۸	۰/۲۰	-۰/۶۹۹	۱/۹۳

متناظر (سطح براونی)، شرایط لازم برای همبود کانیایی کوارتز-هماتیت-پیریت فراهم شده و عیار طلا به طور نسبی افزایش یافته است. از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی، ناحیه جوشش سیالات گرمایی، موجب تنوع کانه‌ها و پیدایش انواع کوارتز کلوفرمی و نواری می‌شود. ظهور چنین بافتی مقارن با پیدایش ذرات کوچک طلا بوده و مناطق امیدبخش معدنی در ناحیه اثر تحولات بافتی تشکیل می‌شوند (Morison and Guoyi, 2001). با خروج از محدوده بی‌هنجاری سیلیس (بزرگتر از ۲/۵۰)، توزیع سطحی مولفه‌های متناظر به انواع پیچیده‌تری (نظیر توزیع حجمی داده‌ها در حاشیه نزدیک به محیط‌های آشوبناک) تغییر ماهیت می‌دهد که تعبیر و تفسیر آن نیازمند حفر گمانه و مغزه‌برداری است. از دیدگاه فرکتال (Mandelbrot, 2006)، بعد بزرگتر از سه، به عنوان جامعه متشکل از کمیت‌های نامتناظر تلقی می‌شود که در آن، ناحیه‌بندی بافتی منظم و قابل پیش‌بینی مشاهده نمی‌شود. اگرچه برخی از کوارتزهای دانه شکر که در محدوده این توزیع قرار دارند، میزبان خوبی برای عناصر ردیاب در محیط‌های فوق کانساری هستند (Hedenquist et al., 2009).

مطابق نمودار شکل ۵، سازوکار توزیع سیلیس رامند با تشکیل تابع چند فرکتالی، متشکل از جوامع زمينه‌ای، آستانه‌ای و بی‌هنجاری در ارتباط است. بعد فرکتالی جامعه زمينه (کوچکتر از ۱/۶۷)، بیانگر توزیع کانی‌های سیلیس همزمان با ظهور کوارتز کلسدونی است. در این جامعه، تحولات کانیایی رگه‌ها موجب پیدایش بافت شیشه‌ای (تا نیمه متبلور) و گسترش آن در سطح واحدهای دگرسانی شده و احتمال شکل‌گیری کوارتز متبلور (شاخص کانیایی مرتبط با افزایش عیار طلا) ضعیف است. تغییرات بعد فرکتالی آستانه (بین ۱/۶۷ و ۲/۰۹)، بیانگر آغاز تحولات بافتی کانی‌های سیلیس و ظهور رگچه‌های کوارتز است که با توجه به افزایش نسبی اجزاء متناظر سیلیس، احتمال شکل‌گیری بافت کلوفرم نواری بیشتر از جامعه زمينه بوده و افزایش عیار طلا دور از انتظار نمی‌باشد. تغییرات بعد در محدوده بی‌هنجاری سیلیس (بزرگتر از ۲/۰۹)، بیانگر تحولات بافتی است که منجر به ظهور بافت نواری شکل شده است، که در برخی از رگه‌های کوارتزی منطقه رامند مشاهده می‌شود. در ناحیه اثر بی‌هنجاری سیلیس، با توجه به سطح توزیع مولفه‌های



شکل ۵. تابع چگالی توزیع سیلیس بر اساس معادله فرکتالی عیار-مساحت، منطقه رامند

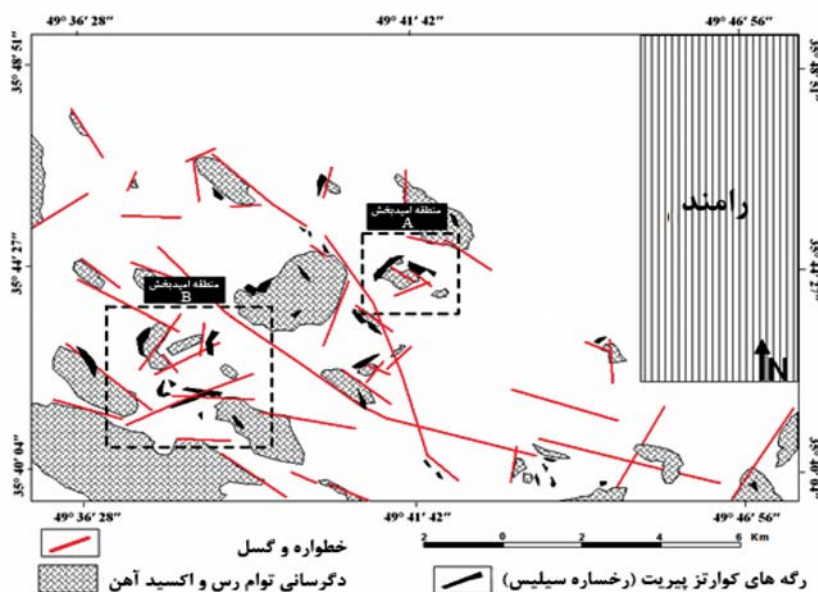
ناحیه‌بندی بافتی در رگه‌های سیلیسی کانه‌دار منطقه رامند

بافتی رگه‌های معدنی، می‌توان به رابطه مکانی بافت‌های منظم (نواری و کلوفرمی) با ناحیه جوش سیال کانه‌دار پی برد (توکل و همکاران، ۱۳۹۲).

در روش کلاسیک، ضریب همبستگی متغیرها (رگرسیون) با استفاده از دو آماره کوواریانس و انحراف معیار داده‌ها محاسبه و برای دستیابی به الگوی توزیع ژئوشیمیایی عناصر ردیاب استفاده می‌شود (حسینی پاک، ۱۳۸۷). در آمار فرکتال، میزان همبستگی داده‌ها تابع تغییرات بعد فرکتال بوده و مستقل از شاخص‌های مرکزی و پراکندگی است (Mandelbrot, 2006). به بیان دیگر، روش کلاسیک فاقد معیارهای لازم برای درک خواص خودتشابهی در پدیده‌های زمین‌شناسی است، در حالی که الگوریتم فرکتال، مبتنی بر شناخت و تحلیل الگوی توزیع کمیت‌های متناظر بوده و با پراکنش طبیعی داده‌ها سنخیت دارد. از آنجا که سازوکار ناحیه‌بندی بافتی ذخایر اپی‌ترمال یک فرآیند پیچیده و درعین‌حال مرتبط با پدیده‌های زمین‌شناختی است، لذا در عمل نیازمند دستیابی به الگوی توزیع غیرخطی داده‌ها و تحلیل مکانی آنها به روش فرکتال هستیم (مهرنیا، ۱۳۹۲). سطح توزیع براونی که بر اساس تغییرات بعد فرکتال بین اعداد دو و ۲/۹ شناخته می‌شود، از بیشترین خواص خودتشابهی

بر اساس تحقیقات به عمل آمده (Morison and Guoyi, 2001)، تحولات بافتی کانی‌های سیلیسی، بخشی از فرآیند تکوین ذخایر طلای اپی‌ترمال است. همچنین با مطالعات به عمل آمده در آثار طلای چهارگوشه میانه (شمال غرب ایران)، ضمن مشاهده تغییرات بافتی و کانیایی سیلیس، رابطه معناداری بین الگوی توزیع غیرخطی سیلیس با افزایش عیار طلا مشاهده شد (Akbari and Mehrnia, 2013). از نقطه نظر تحولات بافتی و کانیایی، پیدایش کلسدونی و تغییر ماهیت آن به کوارتز کلوفرمی، معیار ارزشمندی برای اکتشاف ذخایر ماگمایی-گرمایی است (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۷). در واقع رگه‌های کوارتز کلسدونی فاقد اجزاء بافتی متناظر بوده و این مهم علاوه بر تغییرات کمی سیلیس با نحوه آرایش نقاط هم استقامت و تغییرات بعد فرکتال (شکل ۵) در ارتباط است. در مقابل، شاهد پیدایش رگه‌های کوارتز با ترکیبی از بافت‌های نواری و کلوفرمی هستیم که در آنها روند رشد بلورها به‌طور منظم (و متناظر) بوده و متاثر از تغییرات عیار سیلیس است. از آنجا که سازوکار ناحیه‌بندی بافتی کانی‌های سیلیس ارتباط نزدیکی با تمرکز ترجیحی طلا (و برخی از فلزات پایه) دارد، لذا با مطالعه الگوی ناحیه‌بندی

(بیشینه نقاط هم استقامت در تابع چگالی فرکتال، رابطه ۱) برخوردار است. بنابراین تشخیص محدوده اثر آن برای دستیابی به الگوی ناحیه بندی بافتی سیلیس ضرورت دارد (Turcotte, 1997). با توجه به موارد ذکر شده، بررسی توزیع فرکتالی سیلیس، رهیافت جدیدی برای ارائه نقشه پیش داوری از موقعیت رگه های معدنی حاوی طلا در منطقه رامند است. بدین ترتیب مطابق شکل ۶، از توزیع فرکتالی سیلیس به عنوان معیار ژئوشیمیایی مرتبط با تحولات بافتی کوارتز استفاده شد تا با در نظر گرفتن وضعیت ساختمان های گسلی و رخنمون های دگرسانی منطقه رامند (همیافتی رس با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن)، امکان شناسایی و درج اولویت های اکتشافی طلا فراهم شود.



شکل ۶. نقشه پیش داوری مناطق امیدبخش معدنی (رگه های سیلیسی کانه دار) در ناحیه اکتشافی رامند

مطابق شکل ۶، سازندهای آتشفشانی جنوب غربی رامند به دلیل توسعه هاله های دگرسانی، تعدد ساختمان های گسلی و پیدایش بافت نواری (در رگه ها و رگچه های کوارتزی)، از قابلیت کانه زایی فلزات پایه و گرانبها برخوردارند. لذا تعداد پنج نمونه از رخنمون های دگرسانی جنوب غربی رامند و سه

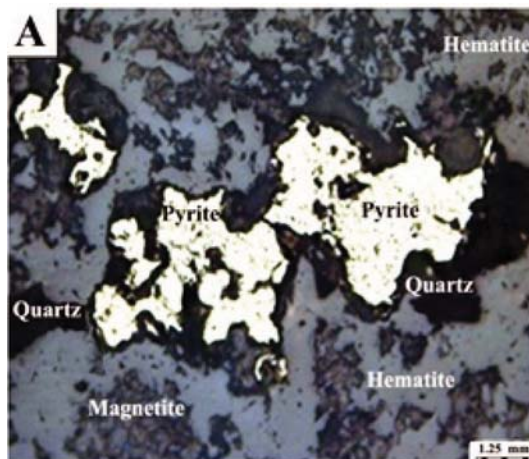
جدول ۳. عیارسنجی طلا به روش طیف سنج جرمی در نمونه های کانه دار منطقه رامند (اولویت نمونه برداری، مطابق مندرجات شکل ۶ است)

نمونه برداری	مختصات (درجه)		کمیتها
	طول	عرض	عیار طلا (میلی گرم در تن)
مناطق امیدبخش	۴۹ ۴۱ ۵۷	۳۵ ۴۴ ۲۲	۱۰۹
	۴۹ ۴۱ ۱۲	۳۵ ۴۴ ۲۹	۴۰۲
	۴۹ ۳۸ ۰۷	۳۵ ۴۱ ۵۱	۸۳۰
	۴۹ ۳۸ ۱۳	۳۵ ۴۲ ۲۲	۳۴۶
	۴۹ ۳۷ ۱۶	۳۵ ۴۱ ۵۵	۲۲۷
	۴۹ ۴۰ ۳۲	۳۵ ۴۲ ۱۹	۷۱
خارج از محدوده	۴۹ ۳۹ ۴۹	۳۵ ۴۶ ۱۰	۵۳
	۴۹ ۳۶ ۳۰	۳۵ ۴۲ ۰۶	۹۶

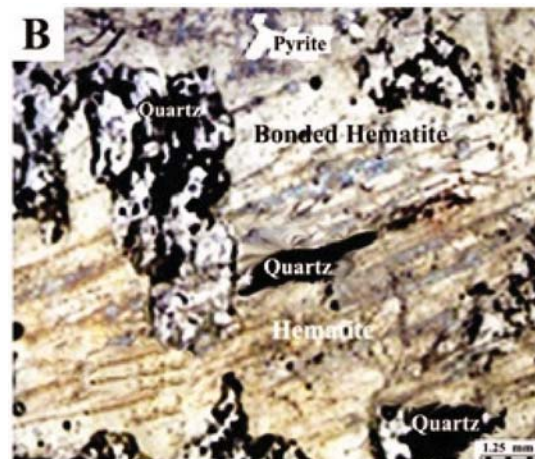
سید رضا مهرنیا

در شکل‌های A.۷ و B.۷، به ترتیب مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های کم‌عیار و پرعیار طلا مشاهده می‌شود که بر اساس شاخص بافتی رگه‌ها انتخاب شده‌اند. پیدایش رخساره کوارتز-پیریت-هماتیت و ظهور بافت نواری موجب افزایش عیار طلا در شکل B.۷ شده است.

با توجه به مندرجات جدول ۳ و اولویت‌های اکتشافی شکل ۶، تحلیل فرکتالی ناحیه‌بندی بافتی، موجب شناسایی رگه‌های کوارتز-پیریت-هماتیت شده که در آنها ضمن افزایش نسبی عیار طلا، بر تعداد کانی‌های اپک (پیریت، ماگنتیت و هماتیت) افزوده شده است.



نیکول عوازی



نیکول عوازی

شکل ۷. نتایج مطالعات مینرالوگرافی منطقه رامند، (A) رگه کوارتز کلسدونی در همیافتی با درشت بلورهای پیریت، ماگنتیت و هماتیت. درجه تبلور سیلیس این نمونه کم و فاقد بافت نواری است. عیار طلای این نمونه ۴۰۲ میلی‌گرم بر تن است. (B) مقطع میکروسکوپی رگه کوارتز نواری متشکل از بلورهای پراکنده پیریت به همراه هماتیت (با بافت نواری). عیار طلای این نمونه ۸۳۰ میلی‌گرم بر تن است

سیلیس، معیار جدیدی برای شناخت تحولات بافتی در ذخایر اپی‌ترمال است (مهرنیا، ۱۳۹۲). همچنین با در نظر گرفتن نتایج مطالعات میکروترمومتری و ژئوترمومتری منطقه رامند، آنتالیپی میانبارهای سیال و محتوای ایزوتوپی رگه‌های معدنی، با شرایط حاکم بر ذخایر اپی‌ترمال مطابقت دارد (Ezzati et al., 2015).

لذا تغییر بافت کانی‌های سیلیس (با تاکید بر پیدایش کوارتز نواری)، از علایم غنی‌شدگی ژئوشیمیایی منطقه رامند بوده و احتمال کانه‌زایی در اعماق دگرسانی را افزایش می‌دهد. جدول ۴، خلاصه وضعیت رگه‌های معدنی رامند را بر اساس ملاحظات آماری آنها و با تاکید بر تحولات بافتی رخساره کوارتز پیریتی نشان داده است. تصمیم به توسعه فعالیت‌های اکتشافی این منطقه، منوط به حفر ترائشه‌های جدید و نمونه‌برداری از رگه‌های عمیق‌تر است. اما در فاز کنونی، احتمال دستیابی به آثار معدنی طلا با توجه به نتایج آنالیزهای دستگاهی و تحولات بافتی رگه‌های کوارتزی وجود دارد.

مقایسه شکل ۴ با شکل‌های ۶ و A-۷، بیانگر تغییرات آستانه‌ای سیلیس (بین ۷۳ تا ۷۹ درصد) است که موجب پیدایش رگه‌های کوارتز کلسدونی با عیار طلای کمتر از ۴۰۲ میلی‌گرم بر تن شده است. همچنین از نقطه نظر توزیع غیرخطی مولفه‌های متناظر (مقایسه شکل ۵ با شکل A-۷)، پیدایش رگه‌های حاوی کوارتز کلسدونی منطبق بر عیار آستانه‌ای سیلیس می‌باشد، که از کمینه مولفه‌های متناظر و کمینه بعد فرکتال در سطح توزیع براونی برخوردار است. مقایسه شکل ۴ با شکل ۶ و شکل B-۷، بیانگر تغییرات بی‌هنجاری سیلیس (بیشتر از ۸۰ درصد) بوده و عامل پیدایش کوارتزهای نواری با عیار طلای ۸۳۰ میلی‌گرم بر تن است.

از دیدگاه فرکتال (مقایسه شکل ۵ با شکل B-۷)، مکان رخنمون‌های کوارتز نواری منطبق بر جامعه بی‌هنجاری سیلیس بوده و افزایش بعد فرکتال، موجب ظهور و کثرت کمیت‌های متناظر در سطح توزیع براونی شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، استفاده از خواص خودتشابهی

جدول ۴. وضعیت رگه‌های سیلیسی رامند بر اساس ملاحظات آماری و تغییرات بافتی رخساره کوارتز-هماتیت

مناطق امیدبخش	محتوای سیلیس (درصد)	بعد فرکتال (FD)	تغییرات بافتی کوارتز	طلا (میلی‌گرم بر تن)
B	۷۵ تا ۸۲	$2/0 \leq FD \leq 2/2$	نواری	۸۳۰
	۷۵ تا ۸۲	$2/0 \leq FD \leq 2/2$	کلوفرم (قلوه‌ای)	۳۴۶
	۷۰ تا ۷۵	$1/8 \leq FD < 2/0$	متبلور ریزبلور	۲۲۷
A	۶۵ تا ۷۰	$1/7 < FD \leq 1/9$	کلسدونی (شیشه)	۴۰۲
	۶۰ تا ۶۵	$1/7 \leq FD < 1/9$	کلسدونی (شیشه)	۱۰۹

نتیجه‌گیری

- رگه‌های معدنی جنوب‌غربی رامند از رخساره کوارتزپیریت با عیار متوسط طلا تشکیل شده‌اند که در مقایسه با بخش‌های مرکزی و شرق کوه رامند، از الگوی ناحیه‌بندی بافتی مناسب و تعدد رخساره‌های دگرسانی برخوردارند. در رگه‌های سیلیسی این منطقه، الگوی ناحیه‌بندی با تغییر بافت شیشه‌ای به کوارتز نواری آغاز شده و افزایش نسبی کانی‌های پیریت، هماتیت و ماگنتیت در ناحیه جوشش سیالات گرمایی (همزمان با ظهور کوارتز نواری) مشاهده می‌گردد.
- نسبت توزیع کانی‌های سیلیس به سایر کانی‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی، بیانگر رابطه توزیع جزء در کل است که بر اساس آن، الگوی پراکندگی سیلیس از نوع غیرخطی با رویکرد توابع پواسونی می‌باشد. بنابراین در اغلب ذخایر معدنی که به نحوی با فعالیت‌های پساماگمایی سنوزوئیک در ارتباط هستند، بررسی نحوه شکل‌گیری کانی‌های سیلیس و تحولات بافتی آنها با استفاده از توابع غیرخطی و با تأکید بر معادلات فرکتال امکان‌پذیر است.
- تابع لگاریتمی عیار-مساحت (رابطه ۱)، برآورد کننده نااریب از خواص خودتشابهی کانی‌های سیلیس بوده و امکان تفکیک جوامع زمینه‌ای، آستانه‌ای و بی‌هنجاری را بر اساس تغییرات بعد فرکتال سیلیس فراهم می‌کند (شکل ۵). معیار جداسازی جوامع متناظر، مستقل از مفاهیم مشتق جبری است و بستگی به رفتار نقاط هم استقامت در نقاط عطف تابع دارد. به طوری که با افزایش ضریب خط کمیت‌های متناظر، بعد فرکتالی سیلیس
- تغییر یافته و جامعه متناظر جدید شکل می‌گیرد.
- الگوی ناحیه‌بندی بافتی ذخایر اپی‌ترمال، متأثر از سازوکارهای غیرخطی با رویکرد توابع فرکتال است. لذا برای دستیابی به شاخص تحولات بافتی منطقه رامند، از تغییرات عیار سیلیس (برحسب درصد) به‌عنوان واحد سیلیکایی مرتبط با رگه‌های معدنی استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده، موید کاربرد روش مذکور در تشخیص تحولات بافتی و تفکیک کانی‌های سیلیس بر اساس خواص خودتشابهی آنهاست. به طوری که در جنوب‌غربی کوه رامند، شاهد وفور کوارتز نواری و در سایر مناطق (به دلیل افزایش کلسدونی)، شاهد تضعیف عوامل بافتی مرتبط با کانه‌زایی طلا هستیم.
- این تحقیق نشان داد که استفاده از ملاک‌های ژئوشیمیایی از قبیل تغییر عیار عناصر شاخص و تشخیص توالی کانی‌های دگرسانی، در همگرایی با معیارهایی که بر اساس تحولات بافتی کانی‌های سیلیس استنباط شده‌اند، موجب کاهش خطای پیش‌داوری گردیده و مناطق مستعد معدنی را با ضریب اطمینان بیشتری معرفی می‌نماید.
- بر اساس نتایج این تحقیق، عیار بیشینه طلا (۸۳۰ میلی‌گرم بر تن) متعلق به یک نمونه کوارتز هماتیت دار در جنوب‌غربی رامند است (جدول ۳). در این نمونه، آثار کانه‌زایی هماتیت و پیریت در زمینه کوارتز نواری مشاهده می‌گردد (شکل ۷-B). از نقطه نظر فرکتالی، محل ظهور بافت نواری با سازوکار شکل‌گیری مولفه‌های متناظر (محدوده بی‌هنجاری سیلیس) متناسب

سید رضا مهرنیا

به نوبه خود موجب افزایش خواص خودتشابهی کانی‌های سیلیس شده (تغییرات بعد فرکتال $2 < FD < 3$) و سطح توزیع براونی را به وجود می‌آورد. لذا بررسی سازوکار توزیع غیرخطی سیلیس (برآورد بعد فرکتال به روش عیار-مساحت) در محدوده رگه‌های کوارتز پیریتی منطقه رامند، روش جدیدی برای شناسایی آثار معدنی است که با تاکید بر کانه‌زایی طلا، تفسیر عکس نقشه‌های ماهواره‌ای (شناسایی رخنمون‌های دگرسانی، شکل ۲) و مطالعات لیتوژئوشیمیایی (جداول ۱ تا ۴) امکان‌پذیر می‌گردد.

منابع

- آقانباتی، ع، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، نشر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۵۲۷.
- توکل، ر.، مهرنیا، س.ر.، نظافتی، ن. و شیخ ذکریایی، ج.، ۱۳۹۲. توزیع ژئوفرکتالی سیلیس و ارتباط آن با کانه زایی طلا در محدوده نیکویه (استان قزوین)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۸ (۱)، ۳۴-۴۶.
- حسنی پاک، ع.ا.، ۱۳۸۷. اصول اکتشافات ژئوشیمیایی. انتشارات دانشگاه تهران، ایران، ۶۱۵.
- کریم‌پور، م.ح.، ملک‌زاده، آ. و حیدریان، م. ر.، ۱۳۸۷. اکتشاف ذخایر معدنی. نشر دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، ۶۳۲.
- مهرنیا، س. ر.، ۱۳۹۲. کاربرد هندسه فرکتال در شناسایی الگوی ناحیه‌بندی بافتی ذخایر اپی ترمال- مطالعه موردی اندیس مس شیخ درآباد (آذربایجان شرقی). نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۵ (۱)، ۲۳-۳۶.
- Akbari, E. and Mehrnia, S.R., 2013. Association of silica fractal distribution with gold mineralization: a case study from Takmeh Dash region, North West of Iran, Journal of Tethys, 1(4): 241-253.
- Crosta, A. P. and Moore, J. Mc., 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A prospecting case history

است (شکل ۵). بنابراین در موارد مشابه می‌توان از معادله عیار-مساحت (رابطه ۱) برای تشخیص الگوی ناحیه‌بندی بافتی سیلیس استفاده کرد. لذا در این تحقیق، رهیافت جدیدی برای اکتشاف ذخایر طلائی رگه‌ای (منشاء گرمایی) ارائه شده که اصول محاسباتی آن مبتنی بر سنجش تغییرات سیلیس و بعد فرکتال با هدف تشخیص الگوی ناحیه‌بندی بافتی در رگه‌های کوارتز است. در این روش، شناسایی سطح توزیع براونی اهمیت دارد. لذا در محدوده $2 < FD < 3$ ، شاهد تغییرات بافتی موثر و مرتبط با ناحیه‌بندی کانی‌های سیلیس هستیم، که به‌طور تجربی با پیدایش کوارتز نواری در ناحیه جوشش سیال کانه‌دار ارتباط دارد (سطح توزیع براونی در جدول ۴). همچنین کاهش بعد فرکتال ($1/9 < FD$)، موجب افت درجه تبلور سیلیس (ظهور کلسدونی در جدول ۴) و افزایش آن ($3 < DF$)، موجب تشدید درجه تبلور سیلیس (ظهور کوارتز بلورین و دانه‌شکری) می‌گردد که از دیدگاه زایشی، ارتباط معناداری با مکان رگه‌های طلا‌دار ندارد (خارج از سطح توزیع براونی است).

• با توجه به نتایج تحقیق، از رهیافت توزیع فرکتالی سیلیس برای شناسایی و معرفی مناطق امیدبخش معدنی استفاده شده است. نظر به خاصیت ناحیه‌بندی بافتی ذخایر اپی ترمال، افزایش نسبی سیلیس (جدول ۴)، موجب افزایش خواص خودتشابهی کوارتز شده و بافت‌هایی با اشکال متناظر مانند کوارتز نواری و کلوفرمی ظاهر می‌شوند. در اغلب ذخایر گرمایی، مکان هندسی بافت‌های کلوفرم و نواری شکل منطبق بر ناحیه جوشش سیال کانه‌دار بوده و احتمال غنی‌شدگی اولیه فلزات گرانبها در محدوده رخساره سرسیت آدولاریایی وجود دارد. بنابراین در محل تبلور بافت‌های متناظر، با افزایش خواص خودتشابهی کانی‌های سیلیس مواجه هستیم، که این منجر به تمرکز ترجیحی طلا و عناصر وابسته به کمپلکس‌های سولفیدی و بی‌سولفیدی می‌گردد. به‌طور مثال در جنوب‌غربی رامند، شاهد ظهور رگه‌های سیلیسی با درصد $SiO_2 > 80$ هستیم که

- in Greenstone belt terrain. In: Proceedings of the seventh ERIM thematic conference: Remote Sensing for Exploration Geology. 1173-1187.
- Ezzati, S.A., Mehrnia, S.R. and Ajayebi, K., 2015. Remotely sensed ore mineralization potentials in Ramand altered region, north of Iran. American Journal of Civil Engineering, 3(2-2), 18-23.
 - Hedenquist J. W., Arribas, A. and Izawa, E., 2009. Epithermal gold deposits, styles, characteristics and Exploration. American Society of Resource Geology, 12 (4), 83.
 - Mandelbrot, B., 2006. The Fractal Geometry of Nature. W.H Freeman and Company, New York, 468.
 - Morison, G. and Guoyi, D. 2001. Textural Zoning in Epithermal Quartz Veins, AMIRA Project, James Cook University, Queensland, 129.
 - Turcotte, D., 1997. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, Cambridge University, Cambridge, 398.