فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۱۱، شماره ۴۳، پاییز ۱۳۹۶، صفحات ۱۵- ۲۶

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

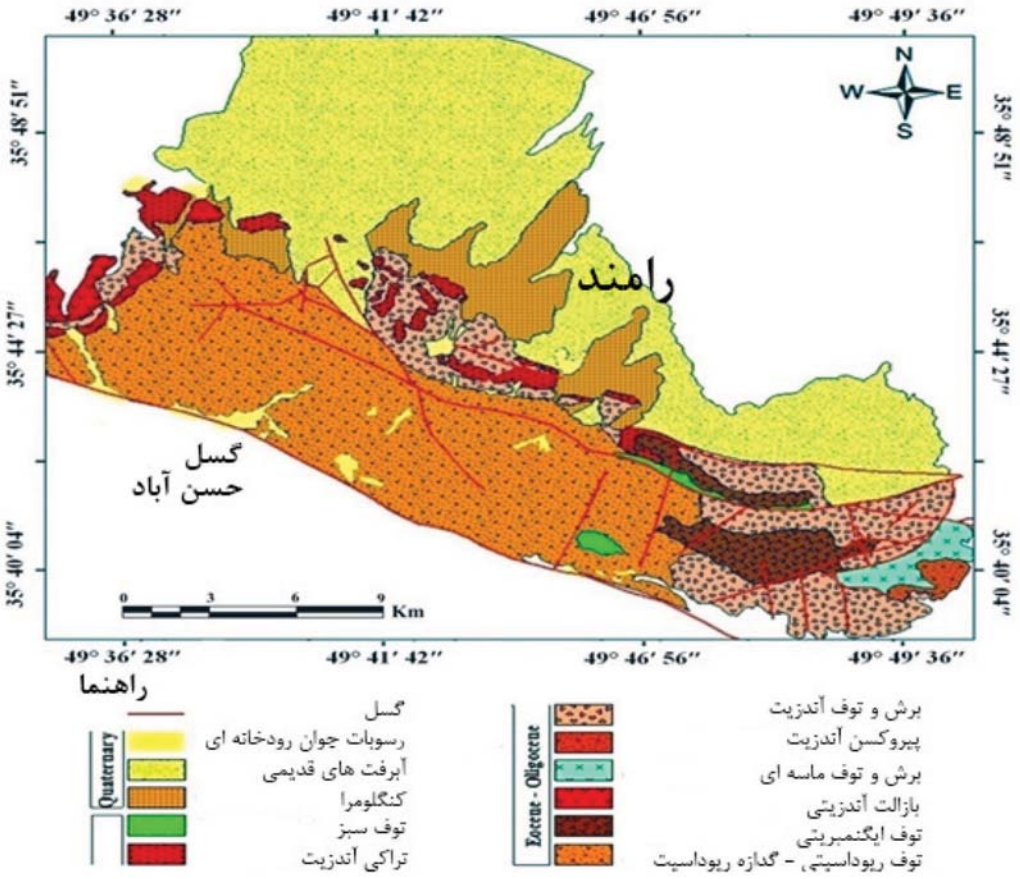
منطقه اکتشـــافی رامند بخشـــی از نوار ماگمایی ارومیه-دختر است که به دلیل قرار گرفتن در ناحیه اثر گسل‌های متقاطع و رخنمون میزبان‌های ریولیتی و ریوداسیتی پالئوژن، تحت تاثیر سیالات ماگمایی قرار گرفته و نشانه‌های بارز کانه‌زایی هیدروترمال در آن مشاهده می‌شود. گوناگونی کانی‌های رسی، کانی‌های خانواده سیلیس و دگرسانی ناشی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، از مظاهر فعالیت‌های پساماگمایی 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 شـــده در این تحقیق مبتنی بر مطالعه تحولات بافتی در رگه‌های کوارتز-پیرتی 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. به‌صورت 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 بررســـی تحولات بافتی آن انجام شده و از روش‌های آنالیز دستگاهی و میکروگرافی رگه‌ها به‌منظور 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

کوه رامند به‌عنوان بخشی از گستره زمین ساختاری ایران مرکزی، در جنوب‌غربی شهرستان بوئین‌زهرا و در فاصله ۶۰ کیلومتری از مرکز اســـتان قزوین قرار گرفته‌است. شکل ۱، سازندهای زمین‌شناسی منطقه را بر اساس مندرجات نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ دانسفهان نشان می‌دهد. رویدادهای پساماگمایی سنوزوئیک، موجب تنوع رخســـاره‌های سنگی این منطقه شـــده و ناحیه‌ای به وســـعت ۷۰ کیلومتر مربع، متشکل از سنگ‌های رسوبی- آتشفشانی پالئوژن، تحت تاثیر دگرسانی گرمابی قرار گرفته است (آقانباتی،۱۳۸۳). توف‌های ریولیتی و ریوداســـیتی رامند، مهم‌ترین رخنمون‌های آتشفشـــانی سنوزوئیک هســـتند که در محل تلاقی گســـل‌ها، میزبان رگه‌های معدنی با ترکیبی از کانی‌های ســـیلیس، پیریت و آرسنوپیریت می‌باشند.

* نویسنده مرتبط: r_mehrniya@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 دانسفهان).

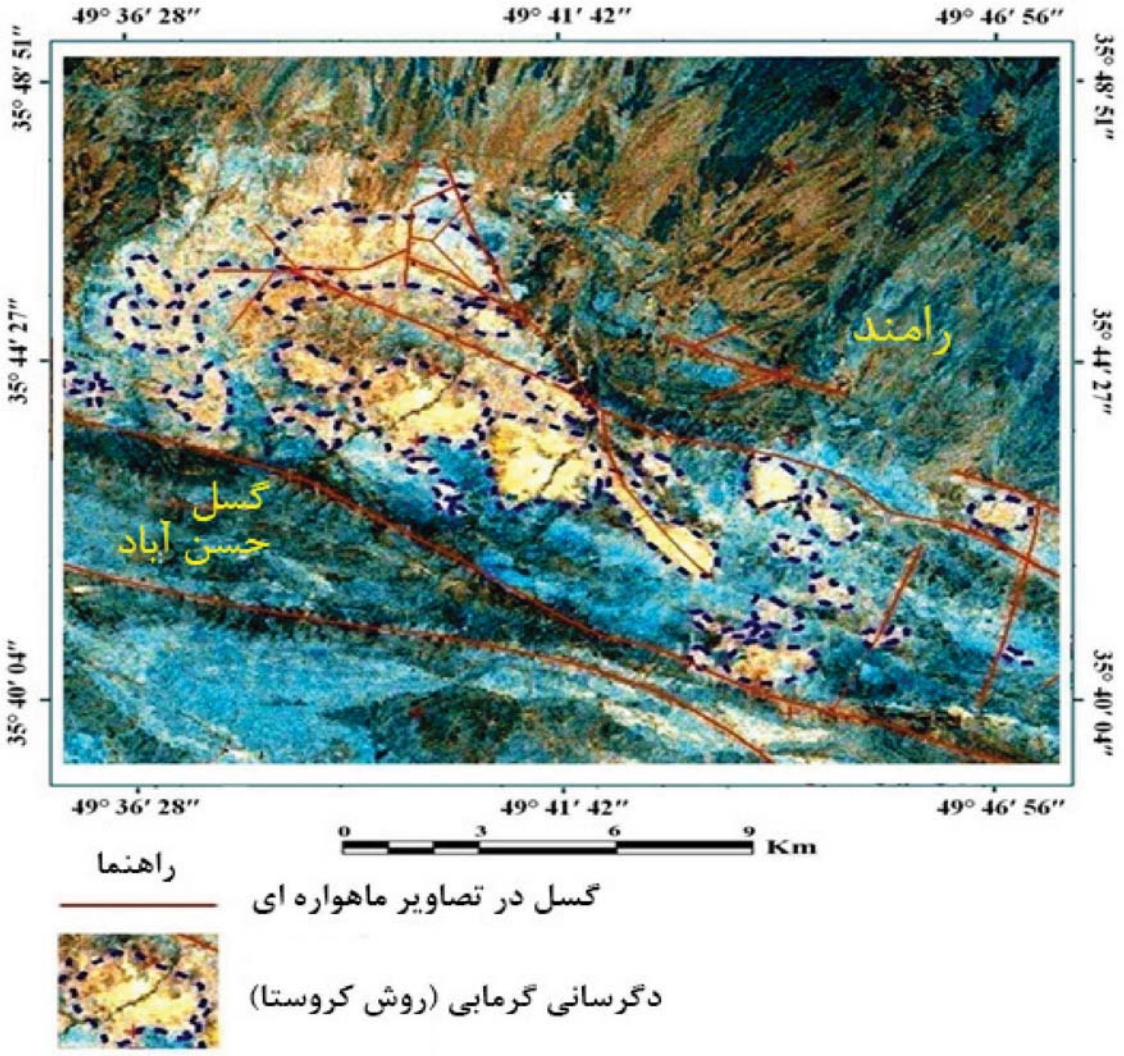
شـــکل ۱. واحدهای زمین‌شناســـی، مناطق دگرسانی و ساختمان‌های گســـلی مرتبط با کانه‌زایی طلا در ناحیه رامند قزوین (برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ دانسفهان)

تنوع و شدت هاله‌های دگرســـانی، 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 ســـامانه‌های اپی‌ترمـــال، همیافتـــی کوارتز-پیریت به‌عنوان ملاکی برای غنی‌شدگی اولیه طلا قلمداد می‌شود (Hedenquist et al., 2009)، بنابراین هدف اصلی تحقیق، دســـتیابی به الگوی توزیع غیرخطی در رگه‌های سیلیسی و بررسی رابطه آنها با افزایش عیار طلا در کوارتزهای نواری شکل منطقه رامند اســـت. تاکنون پی‌جویی‌های متعددی در این منطقه صورت گرفته که نتایج مقدماتی آن موید غنی‌شدگی جزیی طلا (۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌گرم در تن) در واحدهای ریولیتی و ریوداسیتی دگرسان شده می‌باشد (Ezzati et al., 2015). معمولاً توزیع نامتعارف کنترل‌کننده‌های گســـلی، احتمال تجمع ذخایر فلزی را کاهش می‌دهد (حسنی پاک، ۱۳۸۷). لذا رهیافت اکتشـــافی این تحقیق مبتنی بر مطالعه الگوی تحولات بافتی سیلیس می‌باشد که برای اولین بار و مستقل از نتایج معیارهای ژئوشیمیایی، ســـازوکار تمرکز طلا را در نمونه‌های به‌دســـت‌آمده از رگه‌هـــای 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 رســـی آغشته به ترکیبات اکسیدی و هیدروکسیدی آهن به رنگ زرد مایل به نارنجی مشخص شده‌اند. این رخنمون‌ها

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 کلاهک سیلیسی) با توجه به نتایج تحلیل طیفی کروستا (Crosta and Moore، 1989)، 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.



شکل۲. 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

شکل ۳، دورنمایی از کلاهک 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، فاقد رگه‌های معدنی هستند، اما با نزدیک شدن به کلاهک سیلیسی، بر تعداد رگه‌های کوارتز-پیریتی افزوده شده و عیار طلا به‌طور نسبی افزایش می‌یابد (۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌گرم بر تن).

شکل۳. 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)

کانه‌های فلزی این مناطق شـــامل پیریت، آرسنوپیریت و هماتیت اســـت که در برخی از مقاطع بـــه 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، متاثر 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 می‌شـــود. با توجه به روند تحولات بافتی منطقه رامند، دستیابی به الگوی توزیع غیرخطی ســـیلیس، رهیافت مناسبی برای تشخیص مکان هندسی رگه‌های طلادار این منطقه خواهد بود.

برداشت‌های ژئوشیمیایی به‌صورت پیمایش‌های سطحی نامنظم و با هدف دستیابی به ملاک‌های متناسب با ذخایر گرمابـــی صورت گرفتنـــد. دوازده نمونه حـــاوی کانی‌های ســـیلیس از منطقه‌ای به وسعت ۱۸ کیلومتر مربع برداشت شد (Ezzati et al., 2015). جدول ۱، نتایج تغییرات کمی ســـیلیس و طلا را بر اساس ســـنجش‌های به‌عمل آمده به روش رونتگن و طیف‌سنج جرمی نشان داده است. افزایش محتوای سیلیس رگه‌ها متناســـب با شکل‌گیری کانی‌های کوارتز بوده و کاهش نســـبی آن با وفور کانی‌های رســـی در ارتباط است.

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

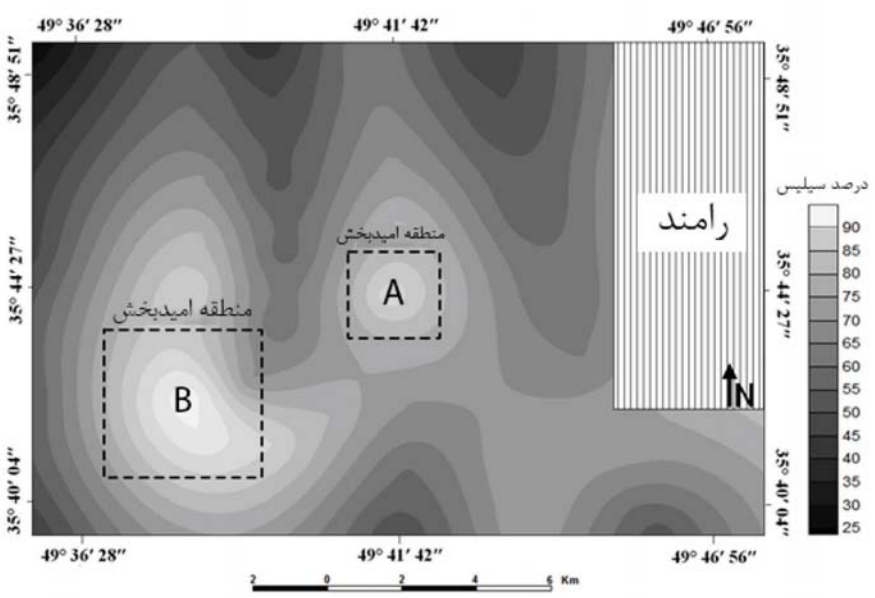
مناطق امیدبخش	مختصات (درجه)		کمیت‌ها	
	طول	عرض	درصد سیلیس	عیار طلا (میلی‌گرم در تن)
A	۴۹ ۳۹ ۴۸	۳۵ ۴۴ ۴۰	۵۸/۹	۱۱
	۴۹ ۳۹ ۵۵	۳۵ ۴۴ ۲۴	۶۱/۲	۵۸
	۴۹ ۴۰ ۰۸	۳۵ ۴۴ ۵۱	۶۴/۰	۴۰
	۴۹ ۴۰ ۳۳	۳۵ ۴۵ ۰۲	۷۲/۰	۴۶
	۴۹ ۴۱ ۱۵	۳۵ ۴۴ ۲۹	۷۳/۵	۱۰۸
	۴۹ ۴۱ ۴۴	۳۵ ۴۳ ۴۹	۷۲/۶	۷۹
B	۴۹ ۳۶ ۵۸	۳۵ ۴۱ ۵۹	۸۰/۲	۱۱۵
	۴۹ ۳۷ ۰۷	۳۵ ۴۲ ۱۹	۸۱/۰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

از آنجـا کـه در خـلال مطالعـات صحرایـی، رابطه مکانـی معناداری بیـن توزیع رگه‌های معدنی و سـازوکار تجمـع ژئوشـیمیایی ترکیبـات فلزی مشـاهده نشـد (Ezzati et al., 2015) لـذا از ارتبـاط تحـولات بافتـی کانی‌های سیلیس با تمرکز ترجیحی طلا در ذخایر اپی ترمال اسـتفاده شـده (Morison and Guoyi, 2001) و مکان هندسی کوارتزهای نواری به‌منظور شناسایی مناطق مستعد معدنی تعیین شده‌اند. بدین ترتیب ضمن بازنگری در پایگاه داده‌های ژئوشـیمیایی منطقه رامند، امکان تقریب ضرایب همبستگی داده‌ها با استفاده از خواص کمیت‌های متناظر و تغییرات بعد فرکتالی آنها فراهم شده است.

در جـدول ۱، تغییرات کمی سـیلیس و عیار طلا درج شده که در ذیل محاسبات این تحقیق، برخی از معیارهای ژئوفرکتالـی به‌منظور ادامه فعالیت‌های اکتشـافی منطقه رامند استنتاج شـده‌اند. بدین ترتیب پس از نمونه‌برداری، 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 شـبکه، درون‌یابی شده و نقشه خطوط پربندی مطابق شـکل ۴ به‌دسـت آمده است. پیش فرض تحلیل‌گر مکانی برای رده‌بندی دامنه تغییرات سیلیس، ۹ رده اسـت که به‌منظور مشاهده جزئیات دقیق‌تر تا ۱۱ رده ارتقاء یافته است. برای درون‌یابی سـیلیس از روش وزن‌دهی در فواصل معکوس استفاده شد که از دیدگاه زمین‌آماری، قابل مقایسه با روش کریجینگ است (Turcotte, 1997).



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

در مرحله بعد، عملیات رده‌بنـدی مجدد بر روی فایل شبکه اعمال شـد که طی آن با استفاده از دامنه تغییرات صحیح و طبیعی سیلیس، آماره‌های مرتبط با توزیع سیلیس مطابق جدول ۲ به‌دست 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 لازم، امکان دستیابی به تابع چگالی فرکتال (معادله عیار-مساحت) مطابق رابطه زیر فراهم می‌شود (مهرنیا، ۱۳۹۲).

$$\text{Log Area } (SiO_2\%) = FD.\ \text{Log } (SiO_2\%) \qquad (۱)$$

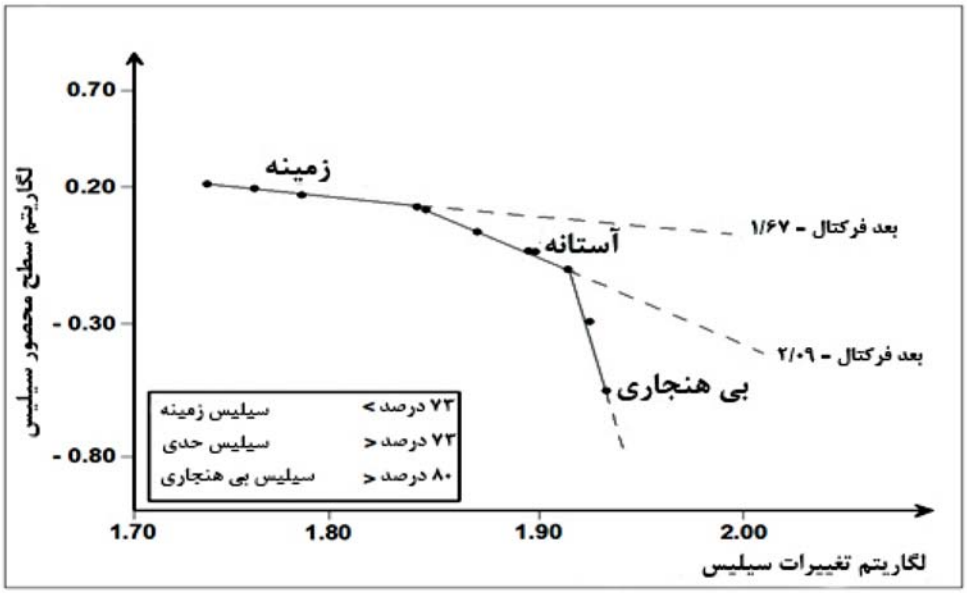
در رابطـه ۱، منظور از جملـه Log Area (SiO_2%)، لگاریتم سـطح زیر توزیع سـیلیس اسـت که نسبت آن با

لگاریتم تغییرات کمی سیلیس (SiO_2٪) Log از نوع خطی اســـت. منظور از FD، ضریب زاویه خط است که به‌عنوان بعد فرکتال منظور می‌شـــود. 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).

جدول۲. معرفی شاخص‌های کمی و هندسی تغییرات سیلیس برای دستیابی به معادله عیار- مساحت در منطقه رامند قزوین (مرجع داده‌ها: جدول۱)

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

مطابق نمودار شکل ۵، ســـازوکار توزیع سیلیس رامند با تشـــکیل تابع چند فرکتالی، متشکل از جوامع زمینه‌ای، آستانه‌ای و بی‌هنجاری در ارتباط است. بعد فرکتالی جامعه زمینه (کوچکتر از ۱/۶۷)، بیانگر توزیع کانی‌های ســـیلیس همزمان با ظهور کوارتز کلســـدونی اســـت. در این جامعه، تحولات کانیایی رگه‌ها موجب پیدایش بافت شیشـــه‌ای (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 (بیـــن ۱/۶۷ و ۲/۰۹)، بیانگر آغاز تحـــولات بافتی کانی‌های سیلیس و ظهور رگچه‌های کوارتز است که با توجه به افزایش نســـبی اجزاء متناظر ســـیلیس، احتمال شکل‌گیری بافت کلوفرم نواری بیشتر از جامعه زمینه بوده و افزایش عیار طلا دور از انتظار نمی‌باشد. تغییرات بعد در محدوده بی‌هنجاری ســـیلیس (بزرگتر از ۲/۰۹)، بیانگر تحولات بافتی اســـت که منجر به ظهور بافت نواری شـــکل شده است، که در برخی از رگه‌های کوارتزی منطقه رامند مشاهده می‌شود. در ناحیه اثر بی‌هنجاری ســـیلیس، با توجه به سطح توزیع مولفه‌های متناظر (ســـطح براونی)، شـــرایط لازم برای همبود کانیایی کوارتز-هماتیت-پیریت فراهم شـــده و عیار طلا به‌طور نسبی افزایش یافته است. از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی، ناحیه جوشش سیالات گرمابی، 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 ســـیلیس (بزرگتر از ۲/۵۰)، توزیع ســـطحی 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، به‌عنوان جامعه متشـــکل از کمیت‌های نامتناظر تلقی می‌شـــود که در آن، ناحیه‌بندی بافتی منظم و قابل پیش‌بینی مشاهده نمی‌شود. اگرچه برخی از کوارتزهای دانه شکری که در محدوده این توزیع قـــرار دارند، میزبان خوبی برای عناصر ردیاب در محیط‌های فوق کانساری هستند (Hedenquist et al.، 2009).



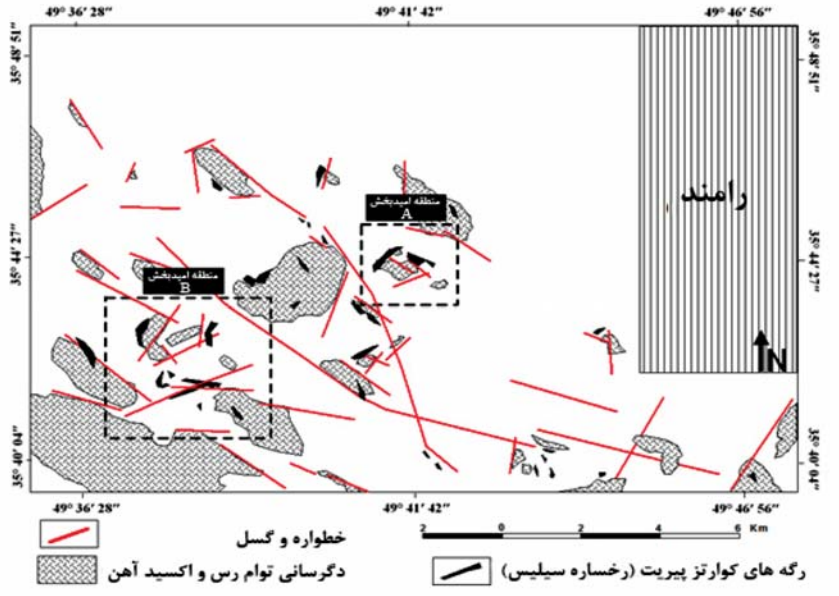
شکل ۵. تابع چگالی توزیع سیلیس بر اساس معادله فرکتالی عیار-مساحت، منطقه رامند

ناحیه‌بندی بافتی در رگه‌های سیلیسی کانه‌دار منطقه رامند

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-گرمابی 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 بافتی رگه‌های معدنی، می‌توان به رابطه مکانی بافت‌های منظم (نواری و کلوفرمی) با ناحیه جوشش 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 (حسنی 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

(بیشینه نقاط هم استقامت در تابع چگالی فرکتال، رابطه۱) برخوردار اســت. بنابراین تشــخیص محدوده اثــر آن برای دستیابی به الگوی ناحیه‌بندی بافتی سیلیس ضرورت دارد (Turcotte، 1997). با توجه به موارد ذکر شــده، بررســی توزیع فرکتالی ســیلیس، رهیافت جدیدی برای ارائه نقشه پیش‌داوری از موقعیت رگه‌های معدنی حاوی طلا در منطقه رامند اســت. بدین ترتیب مطابق شکل ۶، از توزیع فرکتالی سیلیس به‌عنوان معیار ژئوشیمیایی مرتبط با تحولات بافتی کوارتز استفاده شد تا با در نظر گرفتن وضعیت ساختمان‌های گسلی و رخنمون‌های دگرسانی منطقه رامند (همیافتی رس با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن)، امکان شناسایی و درج اولویت‌های اکتشافی طلا فراهم شود.



شکل۶. نقشه پیش‌داوری مناطق امیدبخش معدنی (رگه‌های سیلیسی کانه‌دار) در ناحیه اکتشافی رامند

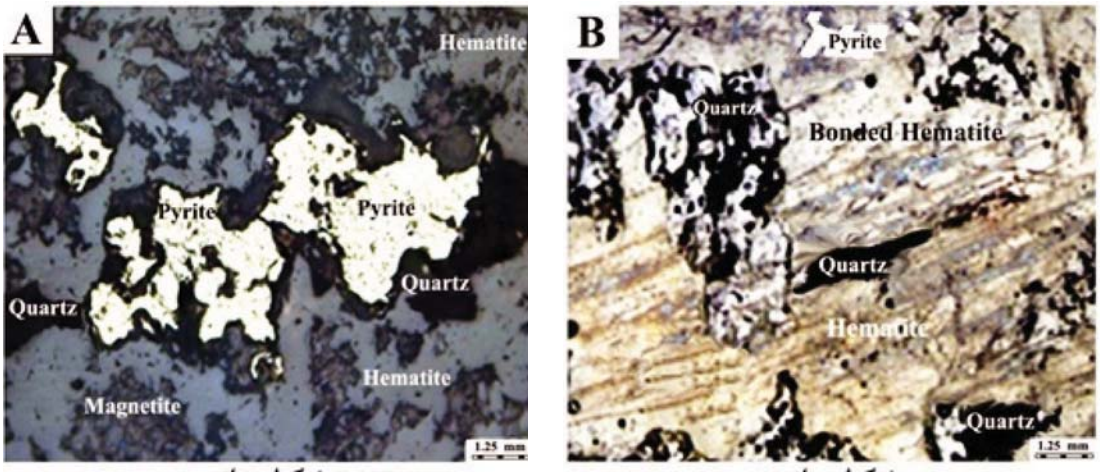
مطابق شکل ۶، سازندهای آتشفشانی جنوب‌غربی رامند به دلیل توســعه هاله‌های دگرســانی، تعدد ساختمان‌های گسلی و پیدایش بافت نواری (در رگه‌ها و رگچه‌های کوارتزی)، از قابلیت کانه‌زایی فلزات پایه و گرانبها برخوردارند. لذا تعداد پنج نمونه از رخنمون‌های دگرسانی جنوب‌غربی رامند و سه نمونه دیگر از رگه‌های متفرقه (فاقد اولویت اکتشافی مندرج در شکل ۶) انتخاب شدند که پس از اندازه‌گیری دستگاهی به روش طیف‌ســنج جرمی، نتایج عیارسنجی طلا مطابق جدول۳ می‌باشد.

جدول۳. عیارســنجی طلا به روش طیف‌ســنج جرمی در نمونه‌های کانه‌دار منطقه رامند (اولویت نمونه‌برداری، مطابق مندرجات شکل۶ است)

نمونه‌برداری	مختصات (درجه)		کمیت‌ها
	طول	عرض	عیار طلا (میلی‌گرم 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

با توجه به مندرجات جدول۳ و اولویت‌های اکتشـــافی شکل۶، تحلیل فرکتالی ناحیه‌بندی بافتی، موجب شناسایی رگه‌های کوارتز- پیریت- هماتیت شـــده کـــه در آنها ضمن افزایش نســـبی عیار طلا، بر تعداد کانی‌های اپک (پیریت، ماگنتیت و هماتیت) افزوده شده است.

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



شکل۷. 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

مقایسه شکل۴ با شـــکل‌های ۶ و A-۷، بیانگر تغییرات آستانه‌ای ســـیلیس (بین ۷۳ تا ۷۹ درصد) است که موجب پیدایش رگه‌های کوارتز کلسدونی با عیار طلای کمتر از ۴۰۲ میلی‌گرم بر تن شـــده اســـت. همچنین از نقطه نظر توزیع غیرخطی مولفه‌های متناظر (مقایسه شکل ۵ با شکل A-۷)، پیدایش رگه‌های حـــاوی کوارتز کلســـدونی منطبق بر عیار آستانه‌ای سیلیس می‌باشد، که از کمینه مولفه‌های متناظر و کمینه بعد فرکتال در ســـطح توزیع براونی برخوردار است. مقایسه شـــکل۴ با شکل۶ و شـــکل 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 رخنمون‌هـــای کوارتز نواری منطبق بـــر جامعه بی‌هنجاری ســـیلیس بوده و افزایش بعد فرکتال، موجب ظهور و کثرت کمیت‌های متناظر در ســـطح توزیع براونی شـــده اســـت. چنانچه ملاحظه می‌شـــود، استفاده از خواص خودتشابهی ســـیلیس، معیار جدیدی برای شـــناخت تحولات بافتی در ذخایر اپی‌ترمال اســـت (مهرنیـــا، ۱۳۹۲). همچنین با در نظر گرفتن نتایج مطالعات میکروترمومتری و ژئوترمومتری منطقه رامند، آنتالپی میانبارهای سیال و محتوای ایزوتوپی رگه‌های معدنی، با شرایط حاکم بر ذخایر اپی‌ترمال مطابقت دارد (Ezzati et al., 2015).

لذا تغییر بافت کانی‌های ســـیلیس (بـــا 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 ترانشه‌های 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.

جدول۴. وضعیت رگه‌های سیلیسی رامند بر اساس ملاحظات آماری و تغییرات بافتی رخساره کوارتز-هماتیت

طلا (میلی‌گرم بر تن)	تغییرات بافتی کوارتز	بعد فرکتال (FD)	محتوای سیلیس (درصد)	مناطق امیدبخش
۸۳۰	نواری	۲/۰≤ FD ≤۲/۲	۷۵ تا ۸۲	B
۳۴۶	کلوفرم (قلوه‌ای)	۲/۰≤ FD ≤۲/۲	۷۵ تا ۸۲	
۲۲۷	متبلور ریزبلور	۱/۸≤ FD <۲/۰	۷۰ تا ۷۵	A
۴۰۲	کلسدونی (شیشه)	۱/۷< FD ≤۱/۹	۶۵ تا ۷۰	
۱۰۹	کلسدونی (شیشه)	۱/۷≤ FD <۱/۹	۶۰ تا ۶۵	

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 گرمابی (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 تاکید بر معادلات فرکتال امکان‌پذیر است.
- تابع لگاریتمی عیار- مساحت (رابطه ۱)، برآورد کننده ناریب 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. به‌طوری‌که با افزایش ضریب خط کمیت‌های متناظر، بعد فرکتالی سیلیس تغییر یافته و جامعه متناظر جدید شکل می‌گیرد.
- الگوی ناحیه‌بندی بافتی ذخایر اپی‌ترمال، متاثر 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. به‌طوری‌که 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

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 طلای رگه‌ای (منشاء گرمابی) 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 ۳>FD>۲، 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 جدول۴). همچنین کاهش بعد فرکتال (۱/۹>FD)، موجب افت درجه تبلور سیلیس (ظهور کلسدونی در جدول۴) و افزایش آن (۳>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 اپی‌ترمال، 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 گرمابی، مکان هندسی بافت‌های کلوفرم و نواری شکل منطبق بر ناحیه جوشش سیال کانه‌دار بوده و احتمال غنی‌شدگی اولیه فلزات گرانبها در محدوده رخساره سریسیت 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 ۸۰ <SiO_2 هستیم که به‌نوبه خود موجب افزایش خواص خودتشابهی کانی‌های سیلیس شده (تغییرات بعد فرکتال ۲<FD>۳) و سطح توزیع براونی را به‌وجود 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)، ۴۶-۳۴.
- 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)، ۳۶-۲۳.

- 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 Minais Gerais State, Brazil: A prospecting case history

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.