



مقاله پژوهشی

کاربرد مدل نمایی پراش - مسافت در بررسی‌های ژئوشیمیایی کانسار روی کالامین (مجتمع معدنی مهدی آباد یزد)

نسرین صدرمحمادی^{۱*}، سید رضا مهرنیا^۲، خلیل رضایی^۱، سلما کادی اوغلو^۳ و محمود هنرور^۴

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، ایران

(۳) گروه مهندسی ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آنکارا، آنکارا، ترکیه

(۴) گروه زمین‌شناسی، شرکت مهندسی مشاور زمین آب‌پی، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

چکیده

معدن روی - سرب کالامین (مهدی‌آباد، یزد، ایران مرکزی)، یک رخنمون اقتصادی غیرسولفیدی با منشأ رسوبی - آتشفشانی است که بر اساس سوابق اکتشافی منطقه، از ویژگی‌های زمین‌شناختی و ژئوشیمیایی متناسب با محیط‌های سوپرژن برخوردار است. در این پژوهش، از سه رهیافت رگرسیون خطی، توزیع پواسونی و تغییرات بعد فرکتال برای بازبینی توزیع‌های ژئوشیمیایی و معرفی اولویت‌های اکتشافی منطقه مورد بررسی استفاده شده است. مقایسه ضرایب رگرسیون خطی و توزیع پواسونی عناصر مختلف، بیانگر تمایل نسبی آنها به توزیع غیرخطی است. بنابراین از مدل نمایی پراش - مسافت برای دستیابی به تغییرات بعد فرکتالی ۱۳ عنصر شاخص و ردیاب ذخایر برون‌دمی استفاده شده است. تعیین سطح توزیع براونی هر عنصر، ملاک هندسی جدیدی است که با فرایند خودساماندهی ژئوشیمیایی در سامانه‌های ماگمایی، گرمایی و آتشفشانی سازگاری دارد. در پیش‌بینی به روش فرکتال، از الگوی ناحیه‌بندی ترکیبی شامل ۱۰ عنصر با سطوح آرمانی و ۳ عنصر با سطوح نزدیک به سطح براونی برای معرفی اولویت‌های اکتشافی منطقه استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که عناصر آرسنیک، روی و آنتیموان از سطوح توزیع براونی مطلوب ($FD > 2$) برای تولید مؤلفه‌های متناظر (عیارهای متناظر) برخوردارند. تغییرات بعد فرکتالی سرب، مس، نقره و گوگرد از نوع محدود، اما قابل برازش با سطوح براونی آرسنیک، روی و آنتیموان بوده و بیانگر ناحیه‌بندی ژئوشیمیایی متناسب با فرایند غنی‌شدگی در عمق رخساره‌های دگرسانی است. لذا بر اساس نقشه پیش‌دآوری مبتنی بر تحلیل‌های واریوفرکتالی، امکان دستیابی به ذخایر هیپوژنیک در برخی از اهداف اکتشافی منطقه کالامین وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: سطح براونی، کالامین، کانی‌سازی روی و سرب، مدل پراش - مسافت

مقدمه

اصول هندسه فرکتال برای نخستین بار در سال ۱۹۸۳ میلادی توسط مندلبروت پایه‌گذاری شد. منطق حاکم بر معادلات فرکتالی مبتنی بر روش‌های غیرخطی است (Mandelbrot, 1983; Wei and Pengda, 2002; Mehrnia, 2009; Zuo and Wang, 2016; Zuo et al., 2016). توابع فرکتال، امکان مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی را به وجود آورده‌اند. در اکتشافات ژئوشیمیایی، تمایل عناصر به خودساماندهی و توزیع عیارهای متناظر از مصادیق کاربرد معادلات فرکتال است. از ویژگی‌های مهم روابط فرکتالی، مستقل بودن کمیت‌های آن از مقیاس توزیع داده‌هاست. از دیدگاه ژئوشیمیایی، الگوی پراکندگی عناصر کمیاب (به‌ویژه آنهایی که در مراحل نهایی تفریق ماگمابه وجود آمده‌اند)، از نوع پواسونی (غیرخطی) با ویژگی‌های فرکتال است (Bölviken et al., 1992). بنابراین جایگزینی روش‌های خطی با مدل‌های فرکتالی، شرایط بهتری را برای شناسایی مناطق امیدبخش معدنی به وجود آورده و مورد توجه متخصصان زمین‌شناسی اقتصادی است (Carranza, 2009; Carranza et al., 2009; Carranza and Sadeghi, 2010; Afzal et al., 2011; Wang et al., 2011; Daneshvar-Saein, 2017; Hashemi-Marand et al., 2018; Abdoli-Sereshghi et al., 2019; Afzal et al., 2019; Alipour-Shahsavari et al., 2020; Farahmandfar et al., 2020; Soltani et al., 2020). از مزایای روش فرکتال، در نظر گرفتن موقعیت دقیق فضایی نمونه‌ها با توجه به ظهور مؤلفه‌های متناظر در مکان‌های معین است که موجب تعیین حد جدایش جوامع بی‌هنجاری از یکدیگر می‌شود. بنابراین بر خلاف روش‌های آماری متداول (کلاسیک)، مبنای تحلیل فرکتالی داده‌ها بر اساس اصل مشابهت‌های زایشی بوده و از تغییرات بعد فرکتال برای شناسایی و تفکیک جوامع بی‌هنجاری استفاده می‌کند (Teymorian-Motlagh et al., 2012).

کاربرد روش فرکتال در اکتشافات ژئوشیمیایی مبتنی بر شناخت توزیع‌های متناظر (خودتشابه) بوده و مقادیر زمینه، آستانه و بی‌هنجاری را بر اساس تغییرات بعد فرکتال تفکیک می‌کند

(Akbari and Mehrnia, 2013). در اغلب محیط‌های

ماگمایی، سازوکار توزیع عناصر کمیاب از نوع خودساماندهی شده است؛ بنابراین با استفاده از معادلات فرکتال، امکان شناسایی و تفکیک هاله‌های ژئوشیمیایی (دگرسانی)، بیش از روابط خطی فراهم می‌شود (Grigoryan, 1974; Bölviken et al., 1992). به این ترتیب، هرچایی که توزیع‌های ژئوشیمیایی با فرایند خودساماندهی همراه باشند و موجب پیدایش عیارهای متناظر شوند، الگوی ناحیه‌بندی عناصر از نوع فرکتال بوده و بر اساس تغییرات بعد فرکتال تعیین می‌شود (Agterberg, 2012; Cheng et al., 2000; Davis, 2002; Cheng et al., 2010; Luz et al., 2014; Parsa et al., 2016). هرچه توزیع یک عنصر کمیاب به تابع توزیع پواسون نزدیک باشد، احتمال بروز رفتارهای فرکتالی بیشتر می‌شود که از نشانه‌های آن افزایش مؤلفه‌های متناظر (تکرارپذیر) در تغییرات عیار و مؤلفه‌های هندسی توزیع است. به‌طور مثال ویژگی توزیع غیرخطی سیلیس و ارتباط آن با تحولات بافتی رگه‌های مینرالیزه، رهیافت نوینی است که نخستین بار توسط مهرنیا (Mehrnia, 2013) برای شناسایی آثار طلای اپی‌ترمال در شمال غرب ایران معرفی شده است. در این پژوهش به بررسی توزیع فرکتالی عناصر شاخص و ردیاب کانسار روی-سرب کالامین پرداخته شده و پایگاه داده‌های مکانی آن از نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی منطقه اکتشافی مهدی‌آباد تأمین شده است (مجمع معدنی مهدی‌آباد). از دیدگاه زمین‌شناسی، رخنمون معدنی منطقه کالامین در بخش بالایی یک سامانه کانساری با نوع رسوبی-بروندمی^۱ قرار گرفته است. سازوکار توزیع عناصر ردیاب و شاخص معدن کالامین و مقایسه آن با الگوی توزیع عناصر فوق کانساری^۲ و تحت کانساری^۳ در ذخایر بروندمی (Grigoryan, 1974; Hassani-Pak, 2012)، از عوامل مهم برای معرفی اولویت‌های اکتشافی منطقه مورد بررسی است. وجود پدیده‌های زمین‌ساختی جوان و تعدد سامانه‌های گسلی، از عوامل توزیع مجدد عناصر و بروز رفتار غیرخطی عناصر در مراحل پیدایش ذخایر ماگمایی،

1. SEDEX (Sedimentary exhalative deposits)

2. Supra-Ore Elements

3. Sub-Ore Elements

گرمابی و آتشفشانی است (Grigoryan, 1974; Mandelbrot, 1983; Mehrnia, 2017). بنابراین، انتظار می‌رود که ناحیه‌بندی ژئوشیمیایی ذخایر برون‌دمی از نوع خودسامانده و مبتنی بر توزیع نمایی عناصر ردیاب و شاخص باشد (Mehrnia, 2017). با توجه به ویژگی‌های کانسار سرب و روی مهدی‌آباد (Ebrahim-Mohseni, 2011; Pourfaraj, 2016; Maghfouri, 2017)، استفاده از روش فرکتال، برای تعیین همبستگی عناصر اولویت داشته و در نگاه کلی، برای اکتشاف کانسارهای رسوبی - برون‌دمی ایران مرکزی ضرورت دارد. بررسی شواهد زمین‌شناسی و رخساره معدنی کالامین (بخش غیرسولفیدی کانسار مهدی‌آباد)، نشان‌دهنده وجود کانی‌سازی سوپرژن در بخش بالایی یک حوضه رسوبی - آتشفشانی است که در خلال رویدادهای برون‌دمی موجب پیدایش آثار معدنی موردنظر شده است. تنوع هاله‌های ژئوشیمیایی و تمایل به توزیع پواسونی در عناصر شاخص و ردیاب معدن کالامین، استفاده از معادلات فرکتالی را برای تعیین رابطه بین عناصر و درک بهتر ناحیه‌بندی ژئوشیمیایی این منطقه توجیه می‌کند. در این پژوهش، با استفاده از معادله پراش - مسافت (الگوریتم واریوفرکتالی)، امکان شناسایی سطح توزیع براونی عناصر به عنوان مکان هندسی پیدایش عیارهای متناظر فراهم شده است (Mark and Aronson, 1984; Thorarinsson and Magnusson, 1990; Teymoorian-Motlagh et al., 2012; Mehrnia et al., 2013).

روش انجام پژوهش

از سوابق پژوهشی و اکتشافی مجتمع معدنی مهدی‌آباد یزد (مشمول بر مقالات، پایان‌نامه‌ها و گزارش‌های مصوب) (شکل A-۱) برای انجام این پژوهش استفاده شده است. این سوابق شامل نتایج بررسی سیالات درگیر، زمین‌شناسی اقتصادی و زمین‌ساخت منطقه مورد بررسی و بیانگر منشأ برون‌دمی کانسار است. برای تعیین اولویت‌های اکتشافی معدن کالامین (شکل ۱-۱)

B)، یک شبکه نمونه‌برداری نیمه‌منظم با فاصله‌های تقریبی ۵۰ متری طراحی شده است. طی عملیات صحرایی و با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰) و توپوگرافی (۱:۲۵۰۰۰، ۱:۱۰۰۰)، تعداد ۱۸۰ نمونه سنگی به روش لپ‌پری و در شعاع ۳ تا ۵ متر از آثار دگرسانی و کانی‌سازی برداشت شدند (شکل ۱-۱C). آنالیز نمونه‌ها به روش ICP-Mass و با هدف تعیین عیار عناصر فلزی و غیرفلزی توسط آزمایشگاه زرآرما، واحد کرمان انجام شده است. مطابق جدول ۱، برخی از عناصر سنسورد در بین نتایج آنالیزهای دستگاهی این منطقه مشاهده می‌شود که دو عنصر کلسیم و لیتیم به دلیل تعداد زیاد مقادیر سنسورد از بانک داده‌ها حذف شدند.

همچنین تعداد ۱۵ مقطع میکروسکوپی برای بررسی‌های پتروگرافی و ۵ مقطع صیقلی برای بررسی‌های مینرالوگرافی، انتخاب و آماده‌سازی شدند. پس از تحلیل اولیه آماری که بر اساس رگرسیون خطی عناصر انجام شد، تعداد ۱۳ عنصر به عنوان عناصر شاخص و ردیاب منطقه کالامین انتخاب و به روش وزن‌گذاری در فاصله‌های معکوس^۱ درون‌یابی شدند تا امکان دستیابی به کمیت‌های مدل‌سازی با استفاده از بسته نرم‌افزاری تحلیلگر مکانی^۲ فراهم شود. لازم به ذکر است که با توجه به بررسی‌های نمونه‌برداری منطقه کالامین، کاربرد روش IDW بیش از سایر روش‌های درون‌یابی بوده و آمارهای مناسب را برای تحلیل آماری عیارهای سطحی فراهم می‌کند (Bonham-Carter, 1998). در ضمن، برای طراحی اولیه نقشه پیش‌داوری از نرم‌افزار Surfer14 استفاده شده و ترکیب لایه‌ها، درج راهنما و تصحیح مختصات نقشه با نرم‌افزار ArcGIS انجام شده است.

زمین‌شناسی

معدن کالامین مهدی‌آباد یکی از قدیمی‌ترین معادن روی و سرب در ایران مرکزی است که در شمال‌غربی پیت اصلی مجتمع معدنی مهدی‌آباد واقع شده است (Pourfaraj, 2016). بر اساس بررسی‌های صحرایی و بررسی‌های نقشه زمین‌شناسی

1. IDW (Inverse Distance Weighting

2. Spatial Analyst

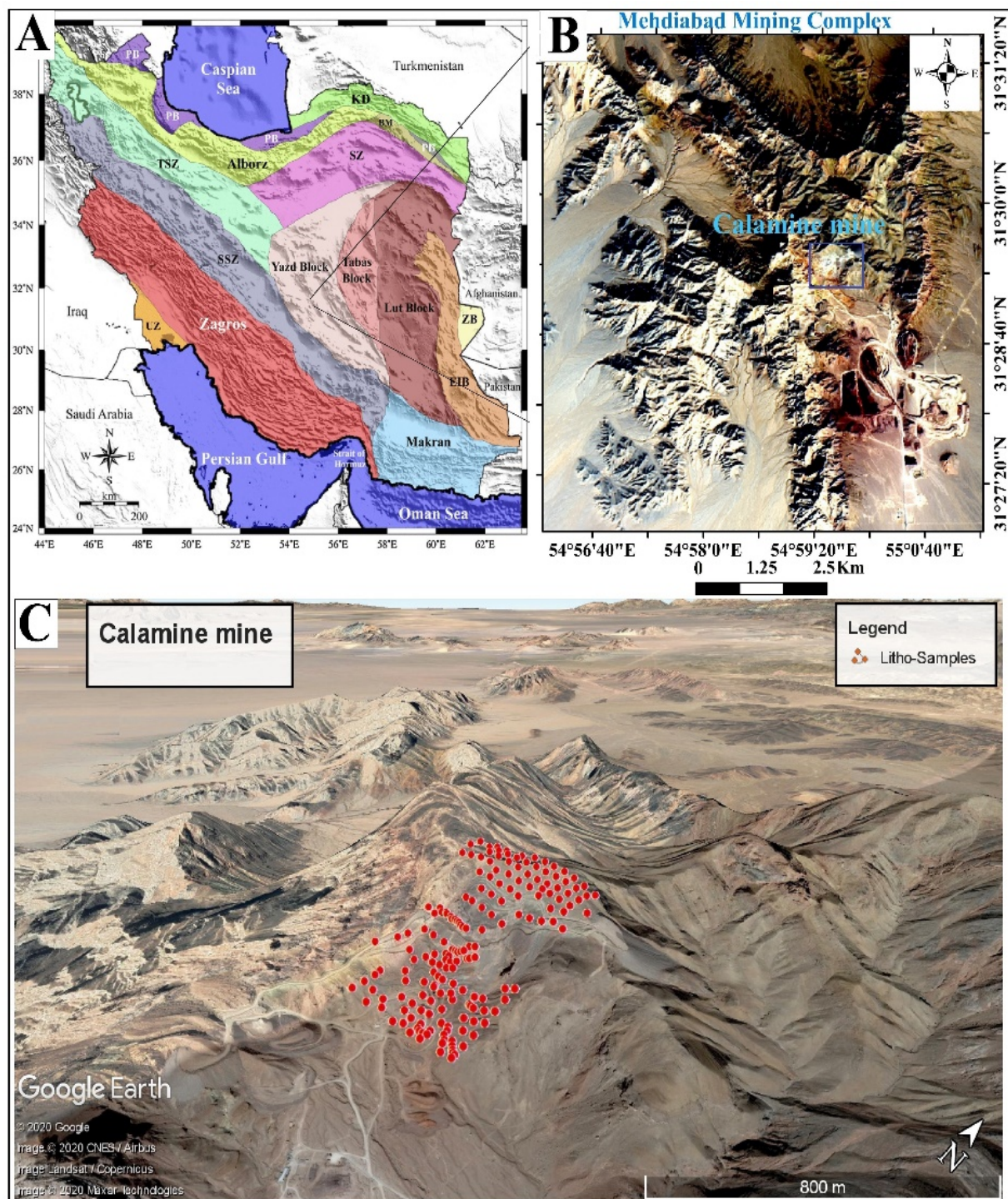
آهک‌های دولومیتی، سیلتستون و آهک‌های مارنی (سبز تا خاکستری متمایل به سبز) به همراه میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک است که در جنوب‌باختری منطقه و در بخش‌های کم‌ارتفاع رخنمون دارند. چنانچه ملاحظه می‌شود، مرز شمال‌خاوری این واحد با سازند آبکوه گسله است. واحدهای کواترنری منطقه نیز اغلب شامل پادگانه‌های آبرفتی جوان، رسوبات آبراه‌ای و واریزه‌های حاصل از معدن‌کاری است.

۱:۱۰۰۰ (Koosha Mining Company, 2018)، رخنمون‌های سنگی منطقه شامل سازندهای رسوبی کرتاسه زیرین، عدسی‌های کانی‌سازی کالامین و رسوبات عهد حاضر است (شکل ۲). کرتاسه زیرین شامل دو سازند سنگستان و آبکوه است که توسط گسل بزرگ تپه‌سیاه^۱ جدا شده‌اند (Pourfaraj, 2016). مطابق شکل ۳، سازند سنگستان (K_s^{Sh}) و K_s^1 متشکل از لایه‌های کم‌ضخامت شیل، ماسه‌سنگ،

جدول ۱. عناصر سنسورد و مقادیر جایگزین آنها در بانک اطلاعات ژئوشیمیایی معدن کالامین (ppm)

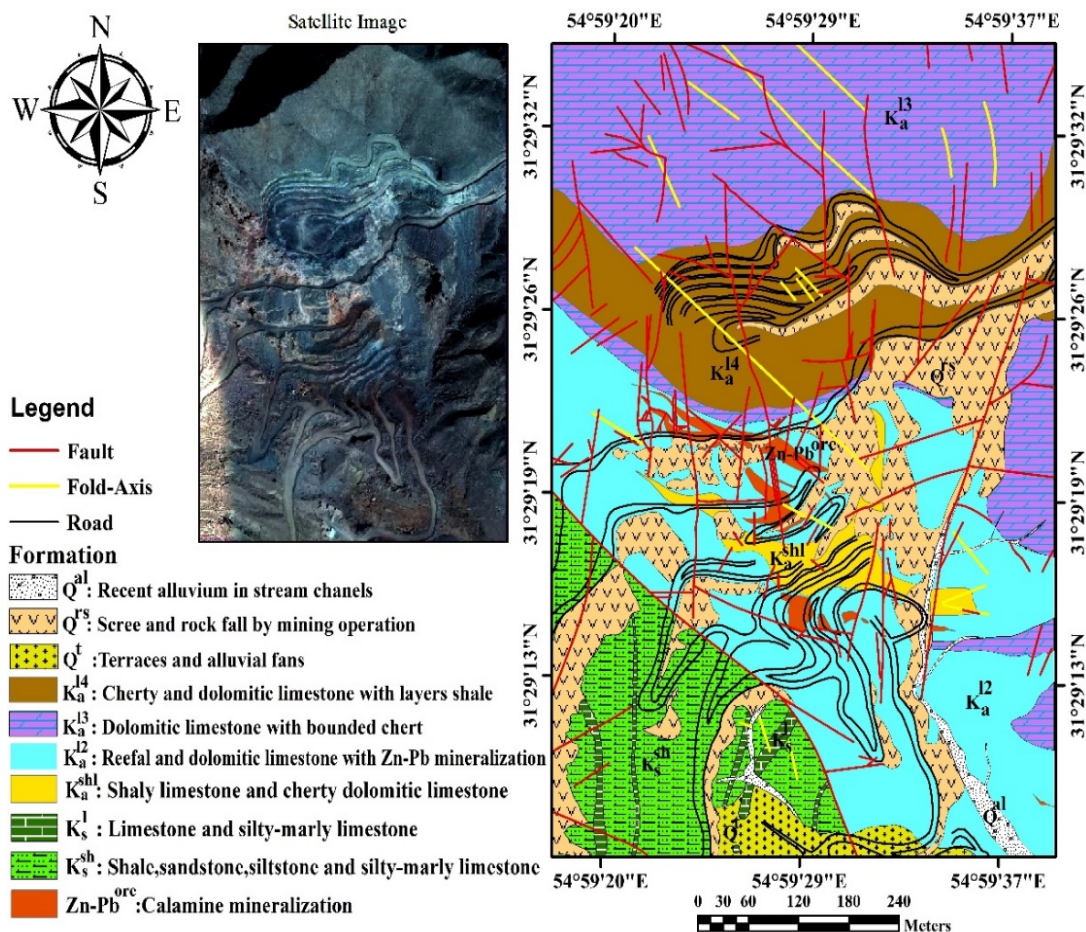
Table 1. The censored elements and their alternative values in the geochemical database of the calamine mine (ppm)

Element	Discrimination Limit	Replacement Value	Number of Censored Data	Censored Data Percentage
Ag	<0.1	0.075	2	1.1%
As	>1%	13300	1	0.6%
Ba	>1%	13300	1	0.6%
Be	<0.2	0.15	5	2.8%
Ca	>10%	133333	163	90.6%
Ce	<1	0.75	27	15.0%
Co	<1	0.75	19	10.6%
Cr	<1	0.75	11	6.1%
Cu	<1	0.75	1	0.6%
Fe	>10%	133333	7	3.9%
Li	<1	0.75	159	88.3%
Mg	>2%	26667	8	4.4%
Pb	>3%	40000	3	1.7%
S	>3%	40000	4	2.2%
Sb	>0.01%	133	17	9.4%
Sc	<0.5	0.375	5	2.8%
Y	<0.5	0.375	1	0.6%
Yb	<0.2	0.15	1	0.6%
Zn	>3%	40000	30	16.7%



شکل ۱. A: نمایی از موقعیت مجتمع معدنی مهدی‌آباد یزد بر روی نقشه ساختاری ایران، B: نمایی از مجتمع معدنی مهدی‌آباد یزد و C: موقعیت نقاط نمونه‌های سنگی برداشت‌شده از معدن کالامین

Fig. 1. A: View of Mahdiabad Mining Complex in Yazd on structural map of Iran, B: Calamine Mehdiabad mine, and C: Location of rock samples taken from Calamine mine



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ معدن کالامین، تهیه شده توسط شرکت کوشا معدن (Koosha Mining Company, 2018)

Fig. 2. Geological map 1:1000 Calamine mine prepared by Koosha Mining Company (2018)



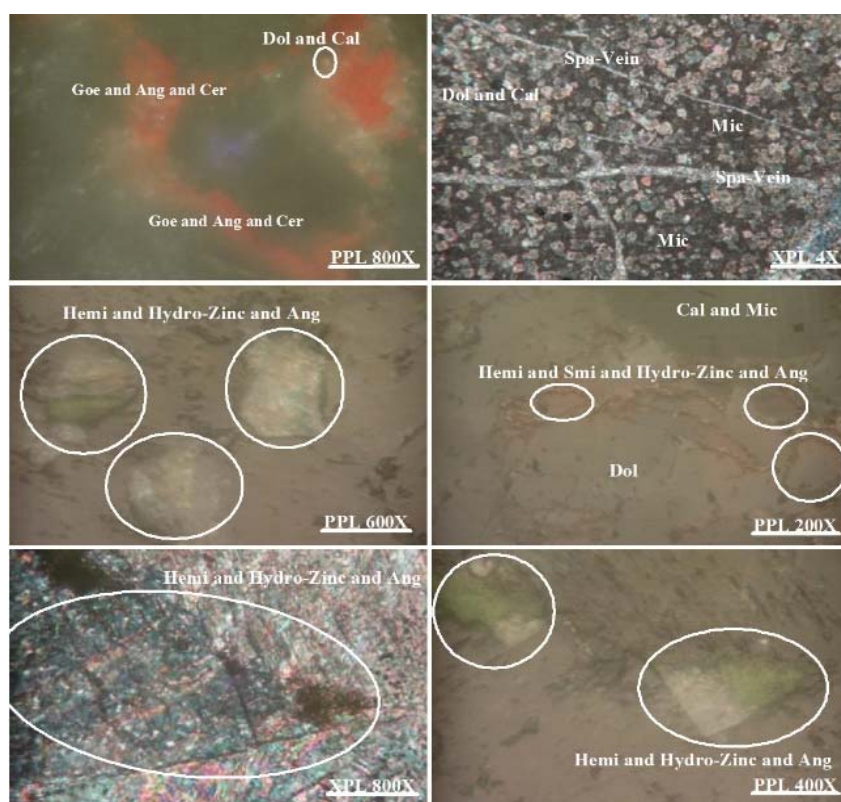
شکل ۳. تصویر پانوراما از مرز گسله سازندهای سنگستان و آبکوه (دید به سمت جنوب‌خاوری منطقه)

Fig. 3. Panorama image of the fault boundary of Sangestan and Abkuoh Formations (view to the southeast of the area)

سازند مینرالیزه آبکوه

آبکوه مهم‌ترین سازند مینرالیزه در محدوده معدن کالامین است (حاوی کانی‌سازی غیرسولفیدی، رخساره کالامین). واحد اصلی‌ترین واحد سازند آبکوه است که متشکل از سنگ آهک، آهک دولومیتی متوسط تا ضخیم‌لایه، توده‌های ستیغ‌ساز و به‌شدت کارستیک بوده و مشخص به کانی‌سازی کالامین

است. علاوه بر کانی‌سازی غیرسولفیدی روی، آثار شکل‌گیری و تجمع ژپس مشاهده می‌شود. برخی از واحدهای سازند آبکوه تحت تأثیر فشارهای زمین‌ساختی گسلیده شده و در بخش‌هایی چین خورده‌اند. شکل ۴، مقاطع میکروسکوپی منسوب به واحد K_a^{12} را نشان داده است.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از انواع کانه‌های اولیه و ثانویه واحد K_a^{12} کانسار روی کالامین مهدی‌آباد یزد (در نور PPL، XPL). حفره‌ها و رگچه‌های پر شده از کلسیت اسپاری و رگچه‌های کلسیتی در زمینه سنگ آهک دولومیتی میکریتی. علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Goe: گویت، Ang: آنگلزیت، Cer: سروزیت، Mic: میکرایت، Spa-Vein: رگه‌های اسپارایتی، Dol: دولومیت، Cal: کلسیت، Hemi: همی‌مورفیت، Hydro-Zinc: هیدروزینکیت، Smi: اسمیت‌زونیت).

Fig. 4. Photomicrographs of primary and secondary ores of K_a^{12} unit on calamine of Mehdiabad, Yazd (XPL, PPL). Voids and veinlets filled with sparry calcite and calcite veinlets in the matrix of micritic dolomite limestone. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Goe: Goethite, Ang: Anglesite, Cer: Cerussite, Mic: Micrite, Spa-Vein: Sparite Veinlets, Dol: Dolomite, Cal: Calcite, Hemi: Hemimorphite, Hydro-Zinc: Hydrozincite, Smi: Smithsonite)

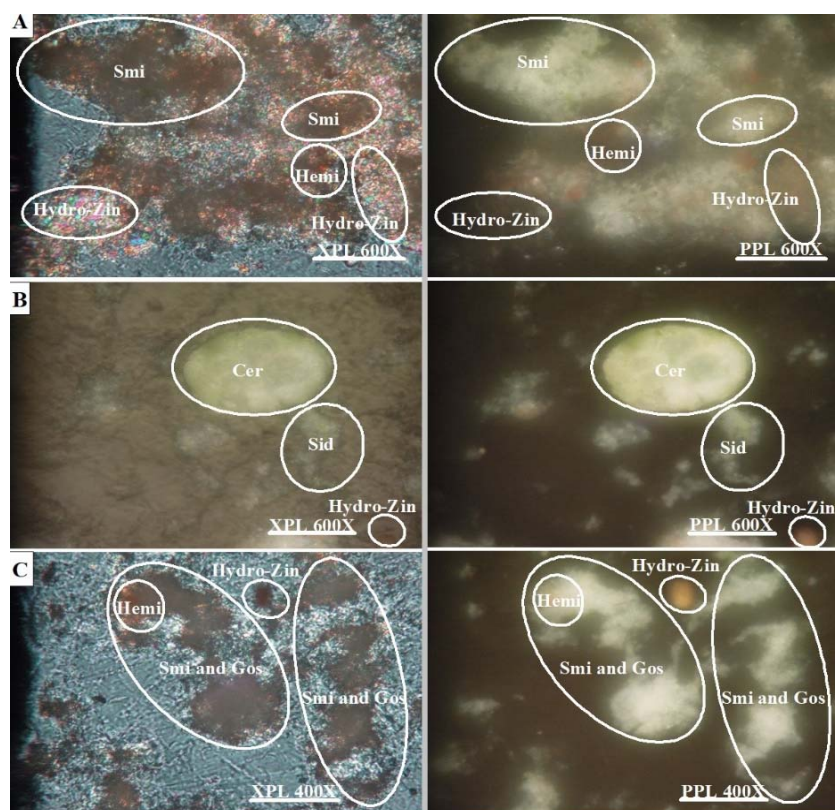
کانی‌سازی

کانی‌سازی معدن کالامین شامل کانی‌های زون اکسیدان روی

(هیدروزینکیت، اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت) و سرب (سروزیت، آنگلزیت) است. رخساره کالامینی منطقه اغلب با

ساختارهای زمین‌ساختی منطقه نظیر گسل‌ها و شکستگی‌ها پیروی می‌کند. معدن کالامین توسط دو گسل تپه‌سیاه (از سمت باختر) و شمال فروزنده (از سمت خاور) محدود شده است (Reichert et al., 2003). در شکل ۵-A، B و C، میکروگرافی برخی از آثار کهنه‌زایی معدن کالامین معرفی شده است.

اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز و به ندرت با کانی‌های سولفیدی روی و سرب مشاهده می‌شود. واحد مینرالیزه منطقه شامل ۳ عدسی اصلی و تعدادی عدسی‌های فرعی و رگه‌های کوچک‌تر است. اغلب عدسی‌ها و رگه‌ها در بخش مرکزی معدن کالامین با عنوان $(\text{Zn-Pb}^{\text{ore}})$ قرار داشته و محدود به واحد ریفی- کارستی K_a^{12} هستند (شکل ۲). امتداد کانی‌سازی‌ها در جهت شمال‌باختری- جنوب‌خاوری است و این روند از



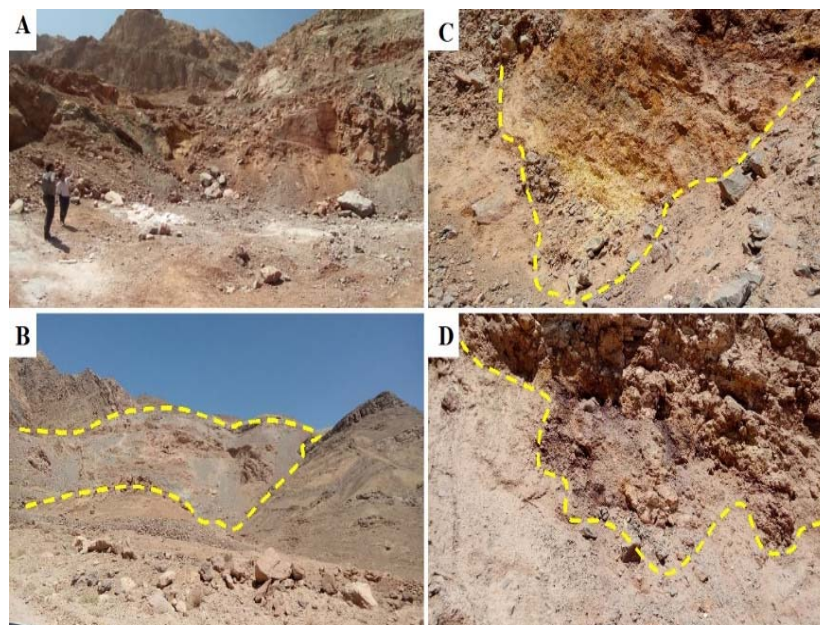
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از انواع کانه‌های اولیه و ثانویه کانسار روی کالامین مهدی‌آباد یزد (در نور XPL, PPL). A: هم‌رشدی اسمیت‌زونیت با رنگ تداخلی سفید و هیدروزینکیت با چندرنگی متمایل به قرمز، B: کانی سروزیت با انعکاس دوگانه و با رنگ تداخلی سفید شیری به صورت جانمایی در قالب کانی گالن که تنها اثراتی از کانی اولیه باقی‌مانده است و C: هم‌رشدی کانی‌های روی شامل اسمیت‌زونیت، سولفات و سیلیکات به همراه هیدروزینکیت و گوسلاریت با بافت کلونیدی. علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Smi: اسمیت‌زونیت، Hemi: همی‌مورفیت، Hydro-Zinc: هیدروزینکیت، Cer: سروزیت، Sid: سیدریت، Gos: گوسلاریت).

Fig. 5. Photomicrographs of primary and secondary ores on calamine of Mehdiabad, Yazd (XPL, PPL). A: Smithsonite intergrowth with white interference color and Hydrozincite with pleochroic reddish, B: Cerussite mineral with birefractance and with the milky white interference color as a replacement in the form of Galena mineral, the only traces of the original mineral residue, and C: Zinc minerals intergrowth includes smithsonite, sulfide and silicate with hydrozincite and goslarite with colloidal texture. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Smi: Smithsonite, Hemi: Hemimorphite, Hydro-Zinc: Hydrozincite, Cer: Cerussite, Sid: Siderite, Gos: Goslarite).

دگرسانی

در کانسار کالامین مهدی‌آباد، سنگ میزبان از نوع کربناته بوده و سیالات کانی‌ساز تحت شرایط دمای پایین به وجود آمده‌اند (Ebrahim-Mohseni, 2011). بنابراین مناطق دگرسانی این کانسار وسعت زیادی ندارند. طبق شکل ۶، رخنمون‌های دگرسانی‌های این کانسار شامل پدیده دولومیتی‌شدن، سلیسی‌شدن و پیدایش اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است.

ایجاد حفره‌های کارستی و پیدایش غارها در سازندهای آبکوه به علت فرایند دولومیتی‌شدن بوده است (Maghfouri, 2017). همچنین به دلیل عبور آب‌های جوی از درون دولومیت‌های آنکریتی، منطقه‌ای غنی از آهن به رنگ‌قهوه‌ای متمایل به زرد (تا قهوه‌ای تیره و قرمز) به وجود آمده است. دگرسانی اکسید آهن شامل کانی‌های سیدریت، گوتیت، هماتیت و لیمونیت بوده و در بخش‌های وسیعی از معدن کالامین مشاهده می‌شود.



شکل ۶. A: دومین عدسی معدن کالامین و آثاری از دگرسانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن، B: نمایی از واحد سنگی دولومیتی‌شده در معدن کالامین، C و D: آثاری از دگرسانی‌ها و تنها مناطق سولفورده باقی‌مانده در دومین لنز معدن کالامین

Fig. 6. A: The second lens of calamine mine and traces of oxide and iron hydroxide alterations, B: View of a dolomitisation rock unit in the calamine mine, C and D: Remains of alterations and the only sulphuride areas left in the second lens of calamine mine

فرمولاسیون و بررسی‌های GIS، برای بررسی تغییرات لوح سنگی میدان نفتی چارک به کار رفته است (Mehrnia et al., 2013). مدل پراش- مسافت یکی از توابع کمتر شناخته‌شده در آمار فرکتال است که ضابطه نمایی آن (رابطه ۱)، بر حسب برد تصادفی پراش داده‌ها V_x ، قلمرو مسافت اثر پراش D_{vx} و توان

معرفی مدل پراش- مسافت و کاربرد آن در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی معدن کالامین

اولین کاربرد مدل پراش- مسافت^۱ در اکتشافات معدنی، بر اساس رابطه نمایی پراش میدان گرانی در مقابل مسافت اثر پراش بوده است (Mark and Aronson, 1984) که پس از بازیابی،

1. Variance-Distance (V-D)

FD بیان می‌شود:

$$Vx = Dvx^{FD} \quad \text{رابطه ۱:}$$

برای تبدیل ضابطه نمایی (۱) به تابع خط فرکتال، از طرفین آن لگاریتم گرفته شد (رابطه ۲):

$$\text{Log}(Vx) = FD \text{Log}(Dvx) \quad \text{رابطه ۲:}$$

در رابطه اخیر، منظور از جملات $\text{Log}(Vx)$ و $\text{Log}(Dvx)$ ، به ترتیب لگاریتم‌های پراش و مسافت اثر پراش داده‌ها و FD، بعد فرکتال^۱ است. در عمل برای نشان‌دادن تابع چگالی هر توزیع، از نموداری استفاده می‌شود که محور طولی آن، نشان‌دهنده تغییرات Dvx و محور عرضی آن، نشان‌دهنده تغییرات Vx است. در سال‌های اخیر، زمان و دقت دستیابی به مدل پراش-مسافت با بهره‌گیری از بسته نرم‌افزاری Spatial Analyst بهبود یافته است (Teymoorian-Motlagh et al., 2012). لذا روش ارائه‌شده در این پژوهش مبتنی بر استاندارد ArcGIS بوده و از سایر نرم‌افزارها (Excel and Surfer) برای تکمیل و ارائه نمودارهای مورد نیاز استفاده شده است.

از دیدگاه ریاضی، رابطه ۲ بیانگر یک تابع نمایی در مختصات لگاریتمی است که تغییرات پراش داده‌ها را برحسب تغییرات مسافت اثر پراش بیان می‌کند (Thorarinsson and Magnusson, 1990). کمیت‌های به کار رفته در این تابع با کمیت‌های مورد استفاده در روش واریوگرافی (زمین‌آمار) مشابهت دارند؛ بنابراین، نقش تغییرات بعد فرکتال در دستیابی به سطح توزیع مؤلفه‌های متناظر (سطح توزیع براونی)، به مانند دستیابی به دامنه تغییرات داده‌ها در روش واریوگرافی است. وجه تمایز این دو روش در شناخت فرایند خودساماندهی^۲ اجزای متناظر با منشأ طبیعی است که به‌طور مشخص بر اساس تغییرات بعد فرکتال تعیین می‌شود و امکان تحلیل و تدقیق آن در مدل‌های زمین‌آماري وجود ندارد (Chen et al., 2016). طبق تعریف، خودساماندهی، سازوکاری طبیعی در خلال توزیع کمیت‌های متناظر و متعدد است که اغلب در رویدادهای

درون‌زاد مشاهده و موجب تمایز آنها از پدیده‌های غیرطبیعی می‌شود (Mandelbrot, 1983). تابع پراش-مسافت، نوعی از تابع نمایی با ضابطه‌مندی فرکتال است که از آن برای شناسایی جوامع متناظر و ارتباط آنها با یکدیگر استفاده می‌شود. از نظر تئوری، سطح توزیع براونی^۳، مکان هندسی پیدایش توزیع‌های فرکتالی در حاشیه محیط آشوبناک است (Mehrnia et al., 2013). بعد فرکتالی که کمتر از حدود توزیع براونی باشد، بیانگر رفتار خطی پدیده بوده و بعد فرکتالی که از حدود توزیع براونی گذشته باشد، نشان‌دهنده آشوبناک بودن توزیع در جامعه مورد بررسی است (هر دو توزیع بدون سازوکار لازم برای شکل‌گیری ذخایر معدنی در محیط‌های ماگمایی و پسا ماگمایی هستند). طبق پژوهش‌های به عمل آمده در ذخایر طلای کوئینزلند (Morison, 2003)، بافت کانی‌های سیلیس به‌ویژه در مناطقی که نسبت به طلا، سرب و برخی از عناصر فلزی غنی شده‌اند، دارای ناحیه‌بندی منظم و خودسازمان‌یافته است که به‌طور مشخص در کوارتزهای کلوفرمی-کراستیفرمی مشاهده می‌شود. از دیدگاه فرکتالی، مکان هندسی ظهور بافت کلوفرمی با افزایش بعد فرکتال در سطح توزیع سیلیکا ارتباط داشته و در $FD=2$ ، شاهد بیشترین تغییرات بافتی غنی از عناصر فلزی هستیم (Akbari and Mehrnia, 2013). روش پراش-مسافت، علاوه بر تعیین حدود بی‌هنجاری عناصر شاخص^۴ و ردیاب^۵، موجب شناسایی و تفکیک سطح توزیع براونی عناصر می‌شود که ملاک جدیدی برای تشخیص همبافتی عناصر در روش‌های غیرخطی است.

تحلیل داده‌ها

با توجه به ماهیت روش‌های غیرخطی و مستقل بودن تغییرات بعد فرکتال از شاخص‌های مرکزی و پراکندگی، کلیه پردازش‌های به عمل آمده در این پژوهش بر روی داده‌های خام انجام شده است. بر این اساس، تعداد ۱۸۰ نمونه سنگی از چهار گوشه معدنی کالامین برداشت و با هدف پیش‌داوری و تعیین

1. Fractal Dimension

4. Indicator

2. Fractal Dimension

5. Pathfinder

3. Self-Organizing

پواسونی نمونه های سنگی صورت گرفته است. با توجه به جدول ۲، ۱۱ عنصر دارای همبستگی نسبی با تغییرات عیار سرب و روی منطقه کالامین هستند. لذا از ۱۳ عنصر ردیاب و شاخص برای تحلیل های واریوفرکتالی و تولید نقشه پیش داوری استفاده شده است.

اولویت های اکتشافی آن، بررسی شده اند. انتخاب عناصر شاخص و ردیاب این پژوهش در درجه اول مبتنی بر ماهیت ذخایر برون دمی بوده (Grigoryan, 1974; Hassani-Pak, 2012) و در پی آن، بر اساس سوابق اکتشافی معدن کالامین (Ebrahim-Mohseni, 2011; Pourfaraj, 2016;) (Maghfouri, 2017) و محاسبه ضرایب رگرسیون و توزیع

جدول ۲. ضریب همبستگی و احتمال توزیع پواسونی عناصر شاخص و ردیاب معدن کالامین (λ : میانگین مورد انتظار؛ λ_1 : زمینه؛ λ_2 : آنومالی ها)

Table 2. The correlation coefficient and Possibility of Poisson distribution indicator and pathfinder elements calamine mine (λ : Expected Mean; λ_1 : background; λ_2 : anomalies)

		Supra-ore Elements					Redox Elements			Sub-ore Elements				
		Pb	Zn	Ag	Sb	As	Ba	Fe	S	Cd	Cu	Ni	Co	Cr
Correlation Coef.	Pb	1.00	0.57	0.57	0.81	0.39	0.24	0.79	0.41	0.54	0.06	0.31	0.19	0.12
	Zn	0.57	1.00	0.22	0.75	0.55	0.42	0.65	0.35	0.66	0.02	0.62	0.38	0.11
Poisson Dist. Coef.	λ_1	0.30	0.38	0.74	0.38	0.45	0.44	0.40	0.40	0.30	0.53	0.55	0.65	0.53
	λ_2	0.35	0.73	0.29	0.51	0.60	0.45	0.42	0.30	0.37	0.31	0.41	0.53	0.37

نقاط نمونه برداری در پیمایش های نیمه منظم (و غیر منظم) است. همچنین، با توجه به تغییرات ضریب پواسونی عناصر (تابع چگالی احتمال رویداد تصادفی جزئی)، لازم است تا نتایج جدول ۲، به روش غیرخطی بازبینی شوند که برای این منظور از تغییرات بعد فرکتالی برای تشخیص سطح توزیع براونی به عنوان ملاکی برای تعیین عناصر ردیاب متناظر استفاده شده است. تابع پراش - مسافت (رابطه ۲)، ضمن رعایت معیارهای زمین آماری، امکان شناسایی سطح توزیع براونی عناصر را فراهم می کند (Mehrnia et al., 2013). این سطح بیانگر مکان هندسی عیارهای متناظر بوده و فقط تابع تغییرات بعد در بازه $3 < FD < 2$ بوده و مستقل از مقیاس برداشت های ژئوشیمیایی است (Afzal et al., 2019).

مشاهده سطح توزیع براونی، نشانه وجود عیارهای متناظر در

با توجه به مطالب جدول ۲، چهار عنصر آنتیموان، آهن، روی، نقره و کادمیم از همبستگی معنادار با سرب برخوردارند. همچنین همبستگی روی با شش عنصر آنتیموان، کادمیم، آهن، نیکل، سرب و آرسنیک قابل توجه و معنادار است. بنابراین، در مدلی که بر اساس تغییرات کوواریانس و انحراف معیار داده ها ارائه می شود (مدل ضریب رگرسیون)، ارتباط سرب و روی با عناصر موجود در هاله لیتوژئوشیمیایی معدن کالامین از نوع خطی و متناسب با تغییرات عیار آرسنیک، آنتیموان و آهن (برای ردیابی سرب) و تغییرات عیار آنتیموان، کادمیم، آهن و نیکل (برای ردیابی روی) است. با فرض آنکه افزایش ضریب همبستگی نشانه همبستگی دو عنصر در حین رویداد کانی زایی باشد، احتمال خطای نوع اول در ارزیابی استعداد معدنی کالامین افزایش می یابد که به دلیل وابستگی نتایج رگرسیون به موقعیت

نشان می‌دهد.

آنتیموان: طبق جدول ۳، سطح براونی آنتیموان ($FD=2/63$) متناسب با تغییرات عیار ۲۶۷ تا ۲۱۶۹ گرم بر تن و در فاصله‌های ۳۷ تا ۶۵ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۱۲۸ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات تدریجی بعد فرکتال (شکل ۷)، توزیع سطحی این عنصر از سازوکار غیرخطی با سطح براونی منتهی به جامعه بی‌هنجاری برخوردار است که نشانه منشأ درون‌زاد و ارتباط زایشی آن با سایر عناصر فوق‌کانساری در منطقه مورد بررسی است.

نقره: طبق جدول ۳، سطح براونی نقره ($FD=2/02$) متناسب با تغییرات عیار ۵۰۸ تا ۱۰۶۲ گرم بر تن و در فاصله‌های ۱۵ تا ۱۷ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۶۳/۵ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات ناگهانی بعد فرکتال (شکل ۷)، توزیع سطحی این عنصر از سازوکار غیرخطی با سطح براونی محدود به جامعه آستانه برخوردار است که در مقایسه با سرب و آنتیموان، قابلیت کمتری برای ردیابی عناصر فوق‌کانساری دارد.

مس: طبق جدول ۳، سطح براونی مس ($FD=2/14$) متناسب با تغییرات عیار ۸۱ تا ۱۱۱ گرم بر تن و در فاصله‌های ۱۹ تا ۲۹ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۱۲۸ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات نسبی-تدریجی بعد فرکتال (شکل ۸)، توزیع سطحی این عنصر از سازوکار غیرخطی با سطح براونی منتهی به جامعه بی‌هنجاری برخوردار است که معیار خوبی برای ردیابی عناصر میان‌کانساری در منطقه مورد بررسی است.

کبالت: طبق جدول ۳، سطح براونی کبالت ($FD=2/05$) متناسب با تغییرات عیار ۱۱ تا ۱۶ گرم بر تن و در فاصله‌های ۲۳ تا ۳۲ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۲۱ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات ناگهانی بعد فرکتال (شکل ۸)، توزیع سطحی این عنصر از سازوکار غیرخطی با سطح براونی محدود به جامعه آستانه برخوردار است که معیار نسبتاً خوبی برای ردیابی عناصر تحت‌کانساری قلمداد می‌شود.

مرحله یا بخش معینی از فرایند کانه‌زایی است. در کانسارهای برون‌دمی و اغلب ذخایر ماگمایی-گرمابی، پیدایش سطح براونی همراه با تغییرات بافتی و کانیایی کانسار بوده و در اغلب موارد موجب تشدید آثار دگرسانی می‌شود. در چنین سطحی، شاهد همیافیتی برخی از عناصر شاخص و ردیاب هستیم. مقایسه تغییرات ضریب رگرسیون (جدول ۲) با سطوح توزیع براونی (جدول‌های ۳، ۴، ۵ و ۶)، بیانگر آن است که این سطوح از قابلیت بیشتری برای تحلیل جزء به جزء تغییرات عیار برخوردارند.

چنانچه در بررسی تابع چگالی دو عنصر، از معادله پراش-مسافت استفاده شود (یعنی فاصله‌های DVx در ناحیه پراش Vx محاسبه شود و روی نمودارهای تمام لگاریتمی ترسیم شود)، پس از تعیین سطوح براونی، امکان دستیابی به نقشه پیش‌داوری جدیدی فراهم می‌شود که از آن برای تعیین روابط مکانی-زایشی عناصر و درج اولویت‌های اکتشافی مناطق امیدبخش معدنی استفاده می‌شود.

مدل پراش-مسافت معدن کالامین

الف) فلزات با سطح توزیع براونی مطلوب

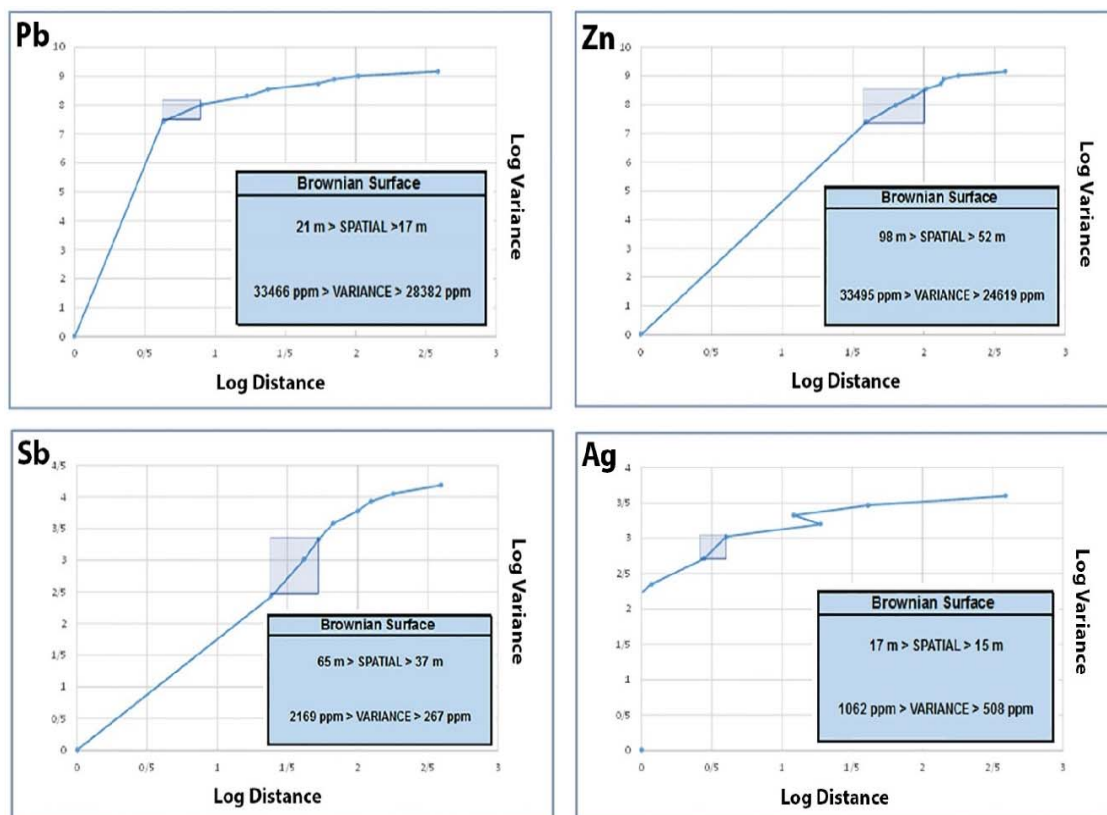
سرب: مطابق جدول ۳، سطح براونی سرب ($FD=2/14$) متناسب با تغییرات عیار ۲۸۳۸۲ تا ۳۳۴۶۶ گرم بر تن و در فاصله‌های ۱۷ تا ۲۱ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۳۸۶۵۷ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات تدریجی بعد فرکتال (شکل ۷)، توزیع سطحی این عنصر از سازوکار غیرخطی با سطح براونی منتهی به جامعه بی‌هنجاری برخوردار است که منشأ درون‌زاد این عنصر را تأیید می‌کند.

روی: طبق جدول ۳، سطح براونی روی ($FD=2/68$) متناسب با تغییرات عیار ۲۴۶۱۹ تا ۳۳۴۹۵ گرم بر تن و در فاصله‌های ۵۲ تا ۹۸ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۳۸۴۸۰ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات تدریجی بعد فرکتال (شکل ۷)، توزیع سطحی این عنصر از سازوکار غیرخطی با سطح براونی منتهی به جامعه بی‌هنجاری برخوردار است که معیار خوبی برای پی‌جویی این عنصر بوده و منشأ درون‌زاد آن

جدول ۳. مدل پراش - مسافت برای فلزات با سطح توزیع براونی مطلوب در معدن کالامین مهدی آباد یزد (FD: بعد فرکتال، BS: سطح توزیع براونی، Var: پراش عیار، D: مسافت اثر پراش عیار، Dn-Dmin: تفاضل مسافت اثر پراش ها، Cum Area: توزیع تجمعی، Grade: عیار بر حسب پی پی ام، Slope: شیب خط)

Table 3. Variance-Distance model for metals with Real BSs on calamine of Mehdiabad, Yazd (FD: Fractal Dimension, BS: Brownian Surface, Var: Variance, D: Distance (m), Dn-Dmin: Differential Distance (m), Cum Area: Cumulative Area, Grade: ppm, Slope: line slope)

Elements	Cum Area	D (m)	Dn-Dmin	Grade (ppm)	Var	Log (Dn-Dmin)	Log (Var)	Slope	FD	BS
Pb	1375	20.93	8.00	28382.43	105578715.74	0.90	8.02	2.15	2.15	Real
	925	17.16	4.233	33466.10	26951468.74	0.63	7.43			
Zn	30225	98.11	85.18	24619.84	192125751.94	1.93	8.28	2.29	2.68	Real
	18025	75.77	62.84	28698.96	95684086.64	1.80	7.98	2.90		
	8625	52.41	39.48	33495.98	24848277.90	1.60	7.40			
Sb	13550	65.69	52.76	81.52	2169.24	1.72	3.34	3.18	2.63	Real
	9425	54.79	41.86	95.85	1039.62	1.62	3.02	2.46		
	4300	37.01	24.08	111.76	266.84	1.38	2.43	1.76		
Ag	900	16.93	4.00	30.96	1062.94	0.60	3.03	2.03	2.03	Real
	350	15.71	2.78	41.01	508.62	0.44	2.71	0.95		
Cu	2700	29.32	16.39	79.0651	2236.33	1.21	3.35	2.27	2.14	Real
	1800	23.94	11.01	98.2484	906.41	1.04	2.96	2.06		
	1175	19.34	6.41	115.1245	296.89	0.81	2.47	3.06		
Co	3300	32.42	19.49	11.33	97.24	1.29	1.99	1.91	2.05	Real
	2350	27.36	14.43	13.80	54.67	1.16	1.74	2.17		
	1700	23.27	10.34	16.04	26.52	1.01	1.42	2.44		
Ni	1025	18.07	5.14	55.09	1021.90	0.71	3.01	1.66	2.31	Real
	825	16.21	3.28	65.05	484.46	0.52	2.69	2.05		
	675	14.66	1.73	76.47	112.02	0.24	2.05			
Cr	52575	129.40	129.40	21.08	861.56	2.11	2.94	1.08	2.69	Real
	22550	84.74	71.81	32.68	315.01	1.86	2.50	2.63	2.71	Real
	14450	67.84	54.91	37.95	155.64	1.74	2.19	1.70		



شکل ۷. تابع چگالی پراش-مسافت برای عناصر ردیاب معدن کالامین. سطوح آبی از نوع براونی هستند.

Fig. 7. V-D density function for pathfinder elements of Calamine. Blue indicates real BS.

غیرخطی با دو سطح براونی منتهی به آستانه ناحیه‌ای و محلی برخوردار است که معیار خوبی برای ردیابی سایر عناصر تحت کانساری محسوب می‌شود؛ اما به دلیل عدم تطابق هندسی با سطح براونی سایر عناصر، در اولویت منطقه قرار نمی‌گیرد.

ب) غیرفلزات با سطح توزیع براونی مطلوب

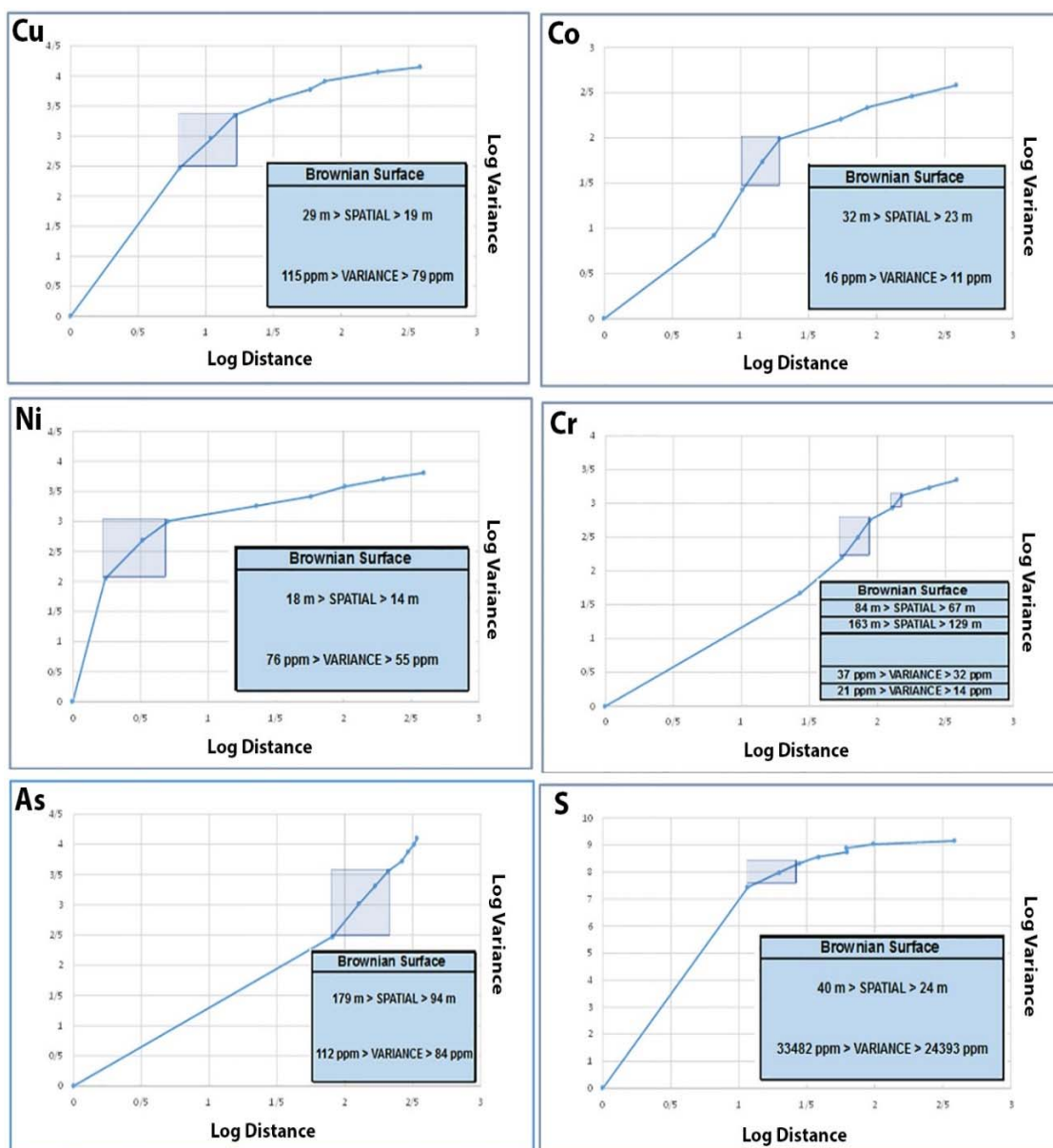
آرسنیک: طبق جدول ۴، سطح براونی آرسنیک ($FD=2/63$) متناسب با تغییرات عیار ۸۴ تا ۱۱۲ گرم بر تن و در فاصله‌های ۹۴ تا ۱۷۹ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۱۲۹ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات بعد فرکتال (شکل ۸)، توزیع سطحی این عنصر دارای روند غیرخطی بوده و پیوستگی اجزای متناظر از حدود زمینه تا بی‌هنجاری مشاهده

نیکل: طبق جدول ۳، سطح براونی نیکل ($FD=2/05$) متناسب با تغییرات عیار ۵۵ تا ۷۶ گرم بر تن و در فاصله‌های ۱۴ تا ۱۸ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۸۷ گرم بر تن) است. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات پلکانی بعد فرکتال (شکل ۸)، توزیع سطحی این عنصر از سازوکار غیرخطی با سطح براونی منتهی به جامعه بی‌هنجاری برخوردار است که معیار مطلوبی برای ردیابی عناصر تحت کانساری است.

کروم: طبق جدول ۳، سطح براونی کروم ($FD=2/70$ & $2/69$) متناسب با تغییرات عیار ۲۱ تا ۳۷ گرم بر تن و در فواصل ۶۷ تا ۱۲۹ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۵۰ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات دو فازی بعد فرکتال (شکل ۸)، توزیع سطحی این عنصر از سازوکار

بر تن) قرار دارد. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات بعد فرکتال (شکل ۸)، توزیع سطحی این عنصر دارای روند غیرخطی و منتهی به جامعه بی‌هنجاری بوده و به‌طور محلی، برخی از ردیاب‌های ژئوشیمیایی کالامین را همراهی می‌کند (حاکمیت شرایط احیایی).

می‌شود. بنابراین آرسنیک عنصر پیش قراول منطقه معدنی کالامین بوده و از قابلیت ردیابی سایر عناصر برخوردار است. **گوگرد:** طبق جدول ۴، سطح براونی گوگرد ($FD=2/20$) متناسب با تغییرات عیار ۲۴۳۹۳ تا ۳۳۴۸۲ گرم بر تن و در فاصله‌های ۲۴ تا ۴۰ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۳۸۷۱۰ گرم



شکل ۸. تابع چگالی پراش- مسافت برای عناصر ردیاب معدن کالامین. سطوح آبی از نوع براونی هستند.

Fig. 8. V-D density function for pathfinder elements of Calamine. Blue indicates real BS.

جدول ۴. مدل پراش - مسافت برای غیرفلزات با سطح توزیع براونی مطلوب در معدن کالامین مهدی‌آباد یزد (FD: بعد فرکتال، BS: سطح توزیع براونی، Var: پراش عیار، D: مسافت اثر پراش عیار، Dn-Dmin: تفاضل مسافت اثر پراش‌ها، Cum Area: توزیع تجمعی، Grade: عیار بر حسب پی‌پی‌ام، Slope: شیب خط)

Table 4. Variance-Distance model for non-metals with Real BSs on calamine of Mehdiabad, Yazd (FD: Fractal Dimension, BS: Brownian Surface, Var: Variance, D: Distance (m), Dn-Dmin: Differential Distance (m), Cum Area: Cumulative Area, Grade: ppm, Slope: line slope)

Elements	Cum Area	D (m)	Dn-Dmin	Grade (ppm)	Var	Log (Dn-Dmin)	Log (Var)	Slope	FD	BS
As	100650	179.04	166.11	84.8843	2013.48	2.22	3.30	2.50	2.63	Real
	61425	139.86	126.93	97.7117	1026.84	2.10	3.01	2.76		
	27750	94.01	81.08	112.4831	298.36	1.91	2.47	1.30		
S	5175	40.60	27.67	24393.12	204992930.97	1.44	8.31	2.24	2.20	Real
	3300	32.42	19.49	29047.86	93370360.91	1.29	7.97	2.34		
	1900	24.60	11.67	33483.00	27328838.93	1.07	7.44			

عنصر از روند خطی با تمایل نسبی به ایجاد مؤلفه‌های متناظر (شبه‌فرکتالی) برخوردار است و در محدوده بی‌هنجاری خود، برای بررسی تغییرات اکسیداسیون-احیایی معدن کالامین مناسب است.

(د) غیرفلزات با سطح توزیع نزدیک به سطح براونی

باریم: طبق جدول ۶، سطح نزدیک به توزیع براونی باریم (۱/۶۰ FD=) متناسب با تغییرات عیار ۷۹۳۹ تا ۱۱۱۷۸ گرم بر تن و در فاصله‌های ۱۴ تا ۱۹ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۱۲۶۱۹ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات پلکانی بعد فرکتال (شکل ۹)، توزیع این عنصر از روند خطی با تمایل نسبی به ایجاد مؤلفه‌های متناظر (شبه‌فرکتالی) برخوردار است. لذا به‌طور نسبی برای ردیابی عناصر فوق‌کانساری کالامین موردنظر است.

(ج) فلزات با سطح توزیع نزدیک به سطح براونی

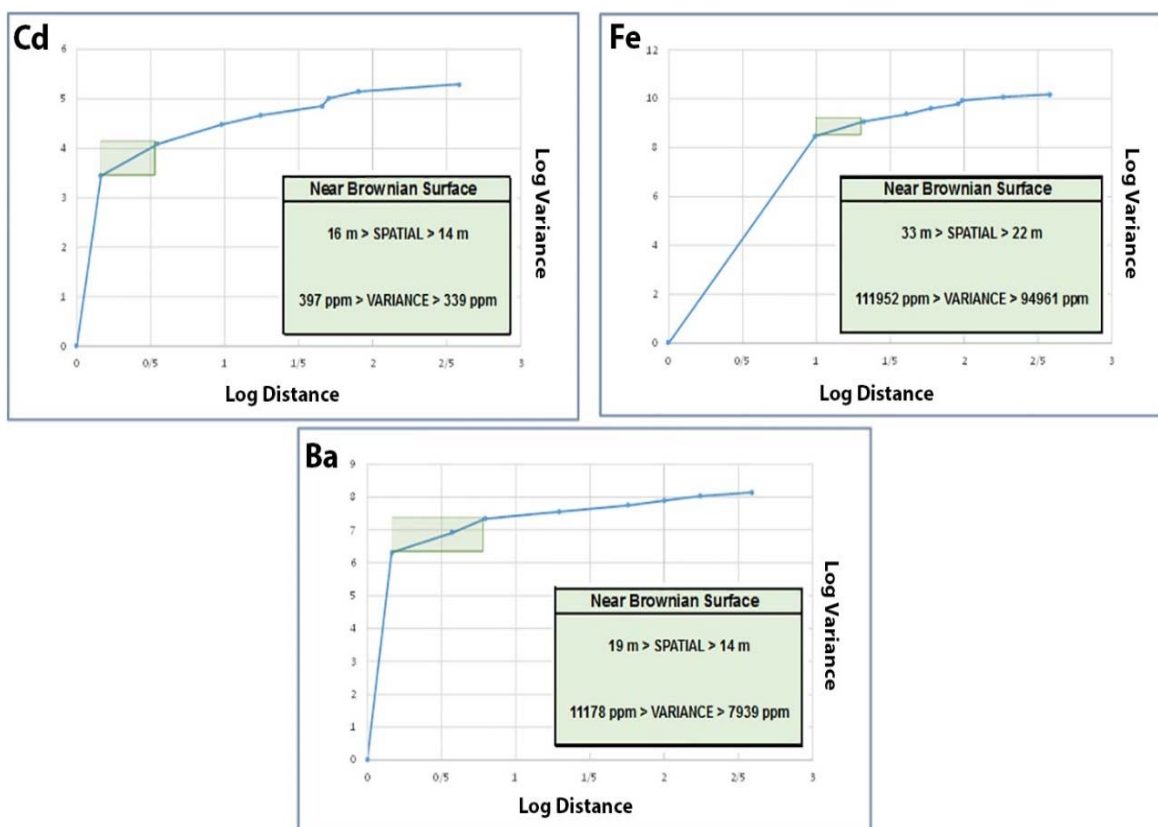
کادمیم: طبق جدول ۵، سطح نزدیک به توزیع براونی کادمیم (FD= ۱/۶۷) متناسب با تغییرات عیار ۳۳۹ تا ۳۹۷ گرم بر تن و در فاصله‌های ۱۴ تا ۱۶ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۴۴۹ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات نامتعارف بعد فرکتال (شکل ۹)، توزیع سطحی این عنصر از روند خطی با تمایل نسبی به ایجاد مؤلفه‌های متناظر (شبه‌فرکتالی) برخوردار است و فقط در محدوده بی‌هنجاری خود، برای ردیابی سایر عناصر میان‌کانساری موردنظر است.

آهن: طبق جدول ۵، سطح نزدیک به توزیع براونی آهن (۱/۸۳ FD=) متناسب با تغییرات عیار ۹۴۹۶۱ تا ۱۱۱۹۵۲ گرم بر تن و در فاصله‌های ۲۲ تا ۳۳ متر از مرکز بی‌هنجاری بیشینه (۱۲۹۰۴۴ گرم بر تن) مشاهده می‌شود. با توجه به وضعیت تابع چگالی و تغییرات نامتعارف بعد فرکتال (شکل ۹)، توزیع سطحی این

جدول ۵. مدل پراش-مسافت برای فلزات با سطح توزیع نزدیک به سطح براونی در معدن کالامین مهدی‌آباد یزد (FD: بعد فرکتال، BS: سطح توزیع براونی، Var: پراش عیار، D: مسافت اثر پراش عیار، Dn-Dmin: تفاضل مسافت اثر پراش‌ها، Cum Area: توزیع تجمعی، Grade: عیار بر حسب پی‌پی‌ام، Slope: شیب خط)

Table 5. Variance-Distance model for metals with Near BSs on calamine of Mehdiabad, Yazd (FD: Fractal Dimension, BS: Brownian Surface, Var: Variance, D: Distance (m), Dn-Dmin: Differential Distance (m), Cum Area: Cummulative Area, Grade: ppm, Slope: line slope)

Elements	Cum Area	D (m)	Dn-Dmin	Grade (ppm)	Var	Log (Dn-Dmin)	Log (Var)	Slope	FD	BS
Cd	850	16.45	3.52	339.38	12210.69	0.55	4.09	1.67	1.67294	Near
	650	14.39	1.46	397.07	2789.11	0.16	3.45			
Fe	3575	33.74	20.81	94961.56	1161622129.94	1.32	9.07	1.84		Near
	1625	22.75	9.82	111952.76	292115366.02	0.99	8.47			



شکل ۹. تابع چگالی پراش-مسافت برای عناصر ردیاب معدن کالامین. سطوح سبز از نوع نزدیک به سطح توزیع براونی هستند.

Fig. 9. V-D density function for pathfinder elements of Calamine. Green indicates near BS.

جدول ۶. مدل پراش - مسافت برای غیرفلزات با سطح توزیع نزدیک به سطح براونی (باریم) در معدن کالامین مهدی‌آباد یزد (FD: بعد فرکتال، BS: سطح توزیع براونی، Var: پراش عیار، D: مسافت اثر پراش عیار، Dn-Dmin: تفاضل مسافت اثر پراش‌ها، Cum Area: توزیع تجمعی، Grade: عیار بر حسب پی‌پی‌ام، Slope: شیب خط)

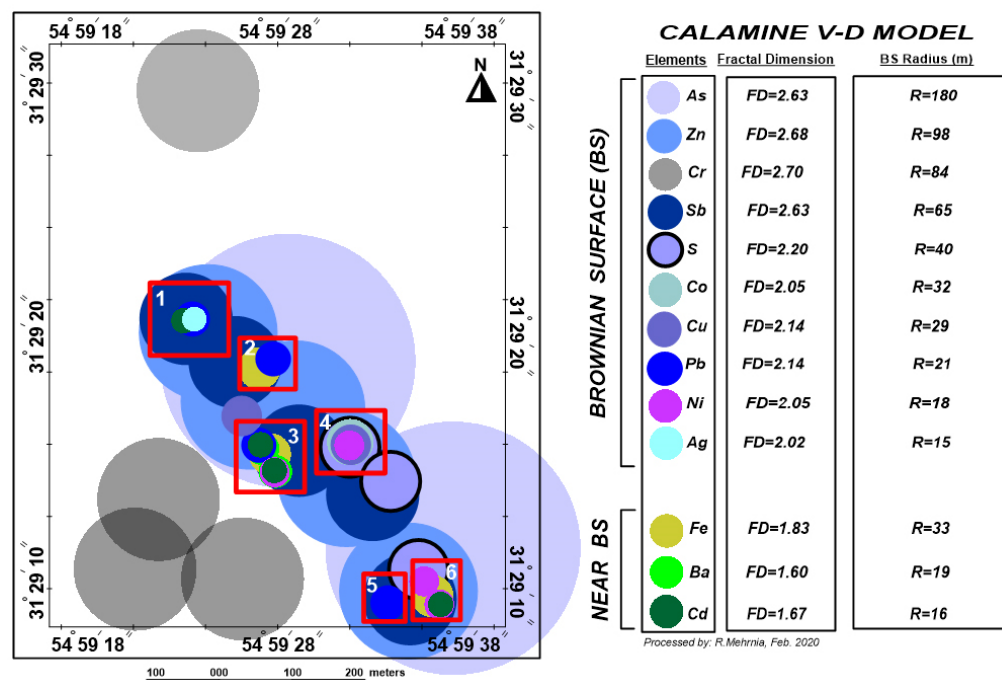
Table 6. Variance-Distance model for non-metals with Near BSs (Ba) on calamine of Mehdiabad, Yazd (FD: Fractal Dimension, BS: Brownian Surface, Var: Variance, D: Distance (m), Dn-Dmin: Differential Distance (m), Cum Area: Cumulative Area, Grade: ppm, Slope: line slope)

Cum Area	D (m)	Dn-Dmin	Ba (ppm)	Var (Ba)	Log (Dn-Dmin)	Log (Var)	Slope	FD	BS
1150	19.14	6.21	7939.64	21903002.79	0.79	7.34	1.95		
875	16.69	3.76	9745.74	8259701.84	0.58	6.92	1.46	1.60344	Near
650	14.39	1.46	11178.65	2076655.36	0.16	6.32			

نقشه پیش‌داوری

با توجه به جدول‌ها و نمودارهای پراش - مسافت (جدول‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ و شکل‌های ۷، ۸ و ۹)، نقشه پیش‌داوری معدن کالامین با معرفی شش ناحیه هدف، طبق شکل ۱۰ ترسیم شده است. با توجه تغییرات بعد فرکتال (راهنمای شکل ۱۰)، سطوح براونی آرسنیک، روی، کروم، آنتیموان، گوگرد، کبالت، مس، سرب، نیکل و نقره در شرایط مطلوبی قرار دارند. عناصر آهن، باریم و کادمیم دارای توزیع نزدیک به سطح براونی هستند. بزرگ‌ترین سطح متعلق به آرسنیک و کوچک‌ترین آن متعلق به نقره و کادمیم است. در بین عناصری که به سطح توزیع براونی رسیده‌اند، سه عنصر آرسنیک، آنتیموان و روی از مؤلفه‌های مشابهی برخوردارند (تغییرات بعد فرکتال و شعاع تأثیر سطوح براونی آنها نظیر هم است) و به‌طور مشخص در حدود زمینه‌ای سایر عناصر قرار دارند. لذا بیانگر فعالیت‌های پسمانگمایی و خودساماندهی عناصر فوق‌کانساری تا میان‌کانساری در خلال رویداد کانه‌زایی منطقه کالامین هستند. کروم تنها عنصری است که مکان هندسی سطح براونی آن مستقل از سطوح براونی آرسنیک، آنتیموان و روی است.

طبق جدول‌های ۳، ۴، ۵ و ۶، تغییرات بعد فرکتالی عناصر شاخص و ردیاب معدن کالامین، بیانگر توسعه سطح توزیع براونی در عناصر آرسنیک، آنتیموان، روی و کروم است. توسعه سطح براونی در سایر عناصر محدودتر بوده و برای عناصر آهن، باریم و کادمیم از نوع شبه‌فرکتالی است (نزدیک به سطح توزیع براونی). همچنین بر روی شکل‌های ۷، ۸ و ۹، نمودارهای پراش - مسافت ۱۳ عنصر شاخص و ردیاب معدن کالامین به صورت لگاریمی رسم شده‌اند. محور افقی این نمودارها نشان‌دهنده مسافت اثر توزیع و محور عمودی آن بیانگر پراش عیار عناصر است. نمودارهایی که سطح توزیع آنها با رنگ آبی مشخص شده، بیانگر توزیع آرمانی عیارهای متناظر در سطح براونی مطلوب است (بعد فرکتالی این سطوح بین ۲ تا ۳ است). در مقابل، نمودارهایی که با رنگ سبز مشخص شده‌اند، بیانگر توزیع غیر آرمانی عناصر بوده و عیارهای متناظر محدود و کمتر توسعه یافته‌ای دارند که مکان هندسی آنها نزدیک به سطح توزیع براونی است (بعد فرکتالی این سطوح کمتر از ۲ بوده و شبه‌فرکتال است). نقشه پیش‌داوری که در زیر ارائه شده، بر اساس فاصله‌های به‌دست آمده از مدل‌های پراش - مسافت و موقعیت سطوح توزیع براونی ترسیم شده است.



شکل ۱۰. نقشه پیش‌دوری به دست آمده از مدل پراش- مسافت در محدوده معدن روی- سرب کالامین (مهدی‌آباد، استان یزد)، مکان هندسی سطوح براونی به شکل دایره رسم شده است تا نشان‌دهنده سطح مقارن توزیع هر عنصر در فاز پیدایش عیارهای متناظر باشد. با توجه به تغییرات بعد فرتال، ده عنصر اول از سطوح توزیع براونی مطلوب و سه عنصر انتهایی از سطوح توزیع نزدیک به سطح براونی برخوردارند.

Fig. 10. Prejudice map obtained from the Variance-Distance model in calamine mine Mehdiabad, Yazd. The geometric location of BSs is circular for representing a symmetrical distribution of self-similarities on fractal surfaces. According to FD variations, the first 10 elements have real BS, while the last 3 elements, contained near BS.

براونی آرسنیک، آنتیموان، سرب و روی مشاهده می‌شود. سرب و آهن هم‌پوشانی ناقصی دارند که ناشی از رفتار شبه‌فرتالی آهن است. نتایج رگرسیون خطی آهن (جدول ۲) با توزیع نزدیک به سطح براونی این عنصر مغایرت دارد؛ یعنی تغییرات عیار آهن بیش از آنکه با توزیع عیار سرب و روی در ارتباط باشد، بیانگر شرایط اکسیداسیون- احیایی حاکم بر محیط کانسار بوده و در حضور گوگرد بر شرایط احیایی دلالت دارد و در غیاب آن، بیانگر شرایط اکسیدی منطقه است. با توجه به نبود سطح توزیع براونی گوگرد، حاکمیت شرایط اکسیدی بیش از شرایط احیایی است. توالی سطوح براونی و مطابقت مکانی آنها با یکدیگر، بیانگر نظم ژئوشیمیایی نسبی در این هدف اکتشافی بوده و برای پی‌جویی ذخایر سرب اولویت

با توجه به رابطه مکانی سطوح براونی، شش هدف اکتشافی با اعداد ۱ تا ۶ بر روی نقشه پیش‌دوری شکل ۱۰ مشخص شده‌اند که به ترتیب اهمیت ژئوشیمیایی و سازوکار مطابقت سطوح براونی به شرح زیر معرفی می‌شوند:

هدف اکتشافی ۱: در این هدف، هم‌پوشانی کامل سطوح براونی آرسنیک، آنتیموان، سرب، روی، نقره و کادمیم مشاهده می‌شود. کلیه سطوح از نوع براونی با $FD > 2$ هستند. بیشینه عیار نقره معدن کالامین متعلق به این هدف بوده و منطبق بر سطح توزیع براونی سرب است. توالی سطوح براونی و مطابقت مکانی آنها با یکدیگر، بیانگر نظم ژئوشیمیایی هدف و اولویت آن برای پی‌جویی ذخایر سرب و روی است.

هدف اکتشافی ۲: در این هدف، هم‌پوشانی کامل سطوح

دارد (عدم شکل‌گیری سطح براونی کادمیم، از اولویت اکتشاف روی می‌کاهد).

هدف اکتشافی ۳: در این چهارگوشه، سطوح براونی عناصر سرب، آرسنیک، آنتیموان، باریم، روی، کادمیم، مس و نیکل مشاهده شده و سطح براونی آهن توسعه یافته است. صرف نظر از ماهیت برخی از عناصر پیش‌قراول (مانند باریم و آرسنیک)، هدف ۳ نشان‌دهنده مستقل بودن سطح براونی سرب از سطوح مس و نیکل است. بنابراین رفتار فرکتالی سرب و ارتباط آن با سطح براونی کادمیم مشابه هدف ۱ است. اگرچه در نبود سطح براونی سرب، هم‌پوشانی نسبی عناصر ردیاب میانی (میان‌کانساری) قابل تأمل بوده و احتمال پی‌جویی آنها را در عمق هاله‌های دگرسانی مطرح می‌کند.

هدف اکتشافی ۴: در این چهارگوشه، شاهد ظهور و توسعه سطح براونی عناصر آرسنیک، آنتیموان، روی، مس، نیکل و کبالت هستیم که در مطابقت مکانی با سطح براونی گوگرد هستند (غلبه شرایط احیایی). بنابراین احتمال دستیابی به زون غنی‌شده در هدف شماره ۴ بیش از سایر هدف‌های اکتشافی کالامین است (اگرچه پیش‌بینی می‌شود که بدون کانی‌سازی برون‌دمی سرب باشد).

هدف اکتشافی ۵: رفتار فرکتالی و تنوع عناصر شاخص و ردیاب در هدف‌های ۵ و ۱ نظیر هم است. با این تفاوت که محدوده ۵، بدون سطح براونی کادمیم و نقره است که می‌تواند ناشی از تلاقی سطح کانه‌زایی به سطح فرسایش منطقه باشد.

هدف اکتشافی ۶: رفتار فرکتالی و توزیع ژئوشیمیایی عناصر ردیاب و شاخص هدف ۶، شباهت زیادی به هدف ۴ دارد. با این تفاوت که هدف ۶، بدون سطح براونی کبالت است؛ اما سطح براونی نیکل آن توسعه یافته است و سطوح براونی کادمیم و آهن نیز به‌وجود آمده‌اند. مجاورت سطوح براونی آهن و گوگرد نشانه تغییرات تدریجی اکسیدان-احیایی منطقه بوده و با سازوکار دگرسانی در شرایط احیایی (هدف ۴) تفاوت دارد. چنانچه ملاحظه می‌شود، عناصری که سطوح براونی آنها در شرایط مطلوب است، از اولویت خوبی برای ردیابی سرب و

روی (به عنوان عناصر شاخص معدن کالامین) برخوردارند. در مقابل، عناصری که توزیع‌شان از نوع شبه‌فرکتالی است (سطوح نزدیک به سطح براونی دارند)، اولویت کمتری برای ردیابی دارند. در این میان، رابطه فرکتالی زوج عناصر روی-کادمیم و سرب-باریم قابل توجه و بیانگر شرایط ردیابی محدود در منطقه مورد بررسی است. همچنین با توجه به موقعیت سطوح براونی نقره و کادمیم، پیش‌بینی می‌شود که اولویت کانه‌زایی سرب در هدف‌های اکتشافی ۱ و ۵ بیش از هدف‌های اکتشافی ۲ و ۳ باشد. کانه‌زایی روی محدود به هدف‌های اکتشافی ۲، ۳، ۴ و ۶ است. با توجه وضعیت سطوح براونی آهن و گوگرد، این کانه‌زایی در هدف‌های ۲ و ۳ متأثر از شرایط اکسیدی و در هدف‌های ۴ و ۶ متأثر از شرایط احیایی است (محدود بودن سطح براونی گوگرد به هدف‌های اکتشافی ۴ و ۶، نشانه‌ای از احتمال غنی‌شدگی در شرایط احیایی است). بر خلاف توزیع شبه‌فرکتالی آهن، تغییرات بعد فرکتالی گوگرد در شرایط آرامانی بوده و هم‌پوشانی خوبی بین سطح براونی گوگرد با سطوح براونی آنتیموان، روی، نیکل و کبالت مشاهده می‌شود. در سطوح براونی گوگرد و آهن، نشانه‌هایی از بی‌نظمی به صورت تغییرات نامتعارف بعد فرکتال مشاهده می‌شود که ممکن است به دلیل تغییر فاز کانه‌زایی یا تأثیر عوامل زمین‌ساختی باشد. پدیده‌های ساختمانی (به‌ویژه گسل‌ها) علاوه بر تغییرات نامتعارف بعد فرکتال، موجب توسعه بی‌هنجاری‌ها و شکل‌گیری سطوح براونی در راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری منطقه کالامین شده‌اند. بر خلاف سطح براونی کروم که مستقل از مکان هندسی سایر سطوح بی‌هنجاری است، توسعه سطح براونی نیکل در مطابقت نسبی با عناصر شاخص و ردیاب منطقه کالامین بوده و در هدف‌های اکتشافی ۴، ۶ و ۳ بیانگر احتمال کانه‌زایی برون‌دمی در عمق رخساره‌های دگرسانی و سنگ میزبان منطقه است.

در مجموع، پتانسیل کانی‌سازی روی در هر شش هدف قابل توجه بوده و در مقایسه با پتانسیل کانی‌سازی سرب (هدف‌های اکتشافی ۱، ۲، ۳ و ۵) از سطح توزیع وسیع و نسبتاً

ملاک دستیابی به نقشه پیش‌داوری معدن کالامین، تعیین سطوح براونی عناصر و چگونگی هم‌پوشانی این سطوح با یکدیگر است. همچنین بر اساس ضرایب پواسونی مندرج در جدول ۲، بررسی رابطه عناصر ردیاب و شاخص این منطقه، نیازمند به‌کارگیری روش‌های غیرخطی بوده و تعیین سطح توزیع براونی عناصر، شرط لازم برای دستیابی به اولویت‌های اکتشافی منطقه است. از دیدگاه فرکتالی، توزیع سطحی دو عنصر سرب و روی به همراه توزیع سطحی برخی از عناصر فلزی و غیرفلزی در شرایط آرمانی است. بنابراین احتمال دارد که ناحیه‌بندی لیتوژئوشیمیایی معناداری در امتداد گسل‌های منطقه وجود داشته باشد که احتمال وجود ذخایر پرعیار را در عمق سنگ میزبان رسوبی - آتشفشانی افزایش می‌دهد. نظر به اینکه پیدایش سطوح براونی سرب و روی به صورت تدریجی و در مطابقت با الگوی خودساماندهی هاله‌های لیتوژئوشیمیایی بوده است؛ لذا پیش‌بینی می‌شود که ناحیه‌بندی منظمی از عناصر و هاله‌های دگرسانی و آثار کانه‌زایی آنها در عمق معدن کالامین وجود داشته باشد که تحت تأثیر عوامل گسلی، سطوح فرسایشی و شرایط اکسایشی کواترنر، تضعیف شده و امکان شناسایی و اولویت‌بندی آنها بر اساس نتایج این پژوهش فراهم شده است.

یکپارچه برخوردار است. در مقابل، پتانسیل کانی‌سازی سرب محدود به هدف‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ بوده و در اغلب آنها هم‌پوشانی خوبی با سطح براونی عنصر روی مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش، مبتنی بر دو معیار واریوگرافی و تغییرات بعد فرکتال است. در مقایسه با اصول زمین‌آماري، مدل پراش - مسافت از نمودارهایی استفاده می‌کند که تغییرات پراش جامعه را در مقابل تغییرات مسافت اثر پراش بررسی می‌کنند. اما بر خلاف روش واریوگرافی، نقاط عطف نمودار پراش - مسافت، تابع تغییرات بعد فرکتال بوده و متأثر از پدیده خودساماندهی ژئوشیمیایی عناصر کانی‌ساز است. روش مورد استفاده برای تعیین ردیاب‌های ژئوشیمیایی منطقه کالامین با آنچه که در سوابق تحلیل آماری این منطقه یافت می‌شود، تفاوت دارد. بر خلاف نتایج رگرسیون خطی (جدول ۲)، توزیع اغلب عناصر شاخص و ردیاب معدن کالامین (جدول‌های ۳، ۴، ۵ و ۶)، از نوع پواسونی و تابع مکان بی‌هنجاری‌ها و شعاع اثر سطوح براونی آنهاست (شکل ۱۰). از این رو، ضریب همبستگی برخی از عناصر (مانند نقره با سرب) با نتایج شکل ۱۰ مغایرت دارد.

References

- Abdoli-Sereshghi, H., Ganji, A., Ashja-Ardalan, A., Torshizian, H. and Taheri, J. 2019. Detection of metallic prospects using staged factor and fractal analysis in Zouzan region, NE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 11(4): 256–266. Retrieved October 16, 2019 from http://ijes.mshdiau.ac.ir/article_669400.html
- Afzal, P., Alghalandis, Y.F., Khakzad, A., Moarefvand, P. and Rashidnejad-Omran, N., 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-Volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(3): 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005>
- Afzal, P., Yousefi, M., Mirzaei, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S. and Daneshvar-Saein, L. 2019. Delineation of podiform-type chromite mineralization using Geochemical Mineralization Prospectivity Index (GMPI) and staged factor analysis in Balvard area (southern Iran). *Journal of Mining and Environment*, 10(3): 705–715. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8107.1678>
- Agterberg, F.P., 2012. Multifractals and geostatistics. *Journal of Geochemical*

- Exploration, 122: 113–122.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.001>
- Akbari, E. and Mehrnia, R., 2013. Association of Silica Fractal Distribution with Gold Mineralization: a case study from the Takmeh-Dash Region, NW of Iran. *Quarterly Journal of Tethys*, 1(4): 241–253. Retrieved November 28, 2013 from
http://journals.pnu.ac.ir/article_2773.html
- Alipour-Shahsavari, M., Afzal, P. and Hekmatnejad, A. 2020. Identification of geochemical anomalies using fractal and LOLIMOT neuro-fuzzy modeling in Mial area, Central Iran. *Journal of Mining and Environment*, 11(1): 99–117.
<https://doi.org/10.22044/jme.2019.8465.1727>
- Bölviken, B., Stokke, P.R., Feder, J. and Jössang, T., 1992. The fractal nature of geochemical landscapes. *Journal of Geochemical Exploration*, 43(2): 91–109.
[https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90001-O](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90001-O)
- Bonham-Carter, G.F., 1998. *Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS*. Pergamon Press, Oxford, 398 pp.
- Carranza, E.J.M., 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews*, 35(3–4): 383–400.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.01.001>
- Carranza, E.J.M., Owusu, E.A. and Hale, M., 2009. Mapping of prospectivity and estimation of number of undiscovered prospects for lode gold, southwestern Ashanti Belt, Ghana. *Mineralium Deposita*, 44(8): 915–938.
<https://doi.org/10.1007/s00126-009-0250-6>
- Carranza, E.J.M. and Sadeghi, M., 2010. Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden). *Ore Geology Reviews*, 38(3): 219–241.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.02.003>
- Chen, G., Cheng, Q. and Zuo, R., 2016. Fractal analysis of geochemical landscapes using scaling noise model. *Journal of Geochemical Exploration*, 161: 62–71.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.11.003>
- Cheng, Q., Xu, Y. and Grunsky, E., 2000. Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research* 9(1): 43–51.
<https://doi.org/10.1023/A:1010109829861>
- Cheng, Q., Xia, Q., Li, W., Zhang, S., Chen, Z., Zuo, R. and Wang, W., 2010. Density/area power-law models for separating multi-scale anomalies of ore and toxic elements in stream sediments in Gejiu mineral district, Yunnan Province, China. *Biogeosciences*, 7(10): 3019–3025. <https://doi.org/10.5194/bg-7-3019-2010>
- Daneshvar-Saein, L., 2017. Delineation of enriched zones of Mo, Cu and Re by concentration-volume fractal model in Nowchun Mo-Cu porphyry deposit, SE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 9(1): 64–74. Retrieved January 3, 2017 from
<https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=542407>
- Davis, J.C., 2002. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley and Sons Inc, New York, 638 pp.
- Ebrahim-Mohseni, M., 2011. Study of genesis of Mehdiabad deposit using fluid inclusion and stable isotope. Unpublished M.Sc. Thesis, Damghan University, Damghan, Iran, 166 pp.
- Farahmandfar, Z., Jafari, M.R., Afzal, P. and Ashja Ardalan, A., 2020. Description of gold and copper anomalies using fractal and stepwise factor analysis according to stream sediments in NW Iran. *Geopersia*, 10(1): 135–148.
<https://doi.org/10.22059/geope.2019.265535.648413>
- Grigoryan, S.V., 1974. Primary geochemical halos in prospecting and exploration of hydrothermal deposits. *International Geology Review*, 16(1): 12–25.
<https://doi.org/10.22059/geope.2019.265535.648413>
- Hashemi-Marand, Gh., Jafari, M.R., Afzal, P. and Khakzad, A., 2018. Determination of relationship between silver and lead mineralization based on fractal modeling in Mehdiabad Zn-Pb-Ag deposit, Central Iran. *Geosciences*, 27(106): 111–118.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2018.58371>
- Hassani-Pak, A.A., 2012. *Principles of geochemical exploration*. University of Tehran

- Publication, Tehran, 615 pp. (in Persian)
- Koosha Mining Company, 2018. Prepared Geological map 1:1000 Calamine mine, Yazd. Mehdiabad Mining Complex.
- Luz, F., Mateus, A., Matos, J.X. and Goncalves, M.A., 2014. Cu-and Zn-soil anomalies in the NE border of the south Portuguese zone (Iberian Variscides, Portugal) identified by multifractal and geostatistical analyses. *Natural Resources Research*, 23(2): 195–215. <https://doi.org/10.1007/s11053-013-9217-5>
- Maghfouri, S., 2017. Geology, Geochemistry, Ore Controlling Parameters and Genesis of Early Cretaceous Carbonate-clastic Hosted Zn-Pb Deposits in Southern Yazd Basin, with Emphasis on Mehdiabad Deposit. Unpublished Ph.D. Thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran, 475 PP.
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, San Francisco, 468 pp.
- Mark, D.M. and Aronson, P.B., 1984. Scale-Dependent Fractal Dimensions of Topographic Surfaces: An Empirical Investigation, with Applications in Geomorphology and Computer Mapping. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16(7): 671–683. <https://doi.org/10.1007/BF01033029>
- Mehrnia, S.R., 2009. Using Fractal Filtering Technique for Processing ETM Data as Main Criteria for Evaluating of Gold Indices in North West of Iran. *International Conference on Computer Technology and Development, ICCTD*, Kota Kinabalu, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/ICCTD.2009.29>
- Mehrnia, S.R., 2013. Application of fractal geometry for recognizing the pattern of textural zoning in epithermal deposits (case study: Sheikh-Darabad Cu-Au indices, East-Azarbaijan province). *Journal of Economic Geology*, 5(1): 23–36. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v5i1.22885>
- Mehrnia, S.R., 2017. Application of Fractal Technique for Analysis of Geophysical - Geochemical Databases in Tekieh Pb-Zn Ore Deposit (SE of Arak). *Journal of Economic Geology*, 8(2): 325–342. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v8i2.42454>
- Mehrnia, S.R., Ebrahimzadeh-Ardestani, V. and Teymoorian-Motlagh, A., 2013. Application of fractal method to determine the Bouguer density of Charak Region (South of Iran). *Iranian Journal of Geophysics*, 7(1): 34–50. http://www.ijgeophysics.ir/article_40598.html?lang=en
- Morison, G., 2003. AMIRA Project, Revised version: Evaluating of Gold Mineralization Potentials in Queensland Epithermal Systems, Queensland J.C Univ. press, Queensland, Australia, 249 pp.
- Parsa, M., Maghsoudi, A. and Ghezelbash, R., 2016. Decomposition of anomaly patterns of multi-element geochemical signatures in Ahar area, NW Iran: a comparison of U-spatial statistics and fractal models. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(260): 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2435-5>
- Pourfaraj, H., 2016. Structural analysis of fault systems in Mehdiabad Zn-Pb Mine area, SE Yazd. Unpublished M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 192 pp.
- Reichert, J., Borg, G. and Rashidi, B., 2003. Mineralogy of calamine ore from the Mehdi Abad zinc-lead deposit, Central Iran. 7th Biennial Meeting, Society for Geology Applied to Mineral Deposits; Mineral exploration and sustainable development, Athens, Greece. Retrieved December 16, 2003 from <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN057745834/Mineralogy-of-calamine-ore-from-the-Mehdi-Abad/>
- Soltani, F., Moarefvand, P., Alinia, F. and Afzal, P., 2020. Detection of Main Rock Type for Rare Earth Elements (REEs) Mineralization Using Staged Factor and Fractal Analysis in Gazestan Iron-Apatite Deposit, Central Iran. *Geopersia*, 10(1): 89–99. <https://doi.org/10.22059/geope.2019.279698.648474>
- Teymoorian-Motlagh, A., Ebrahimzadeh-Ardestani, V. and Mehrnia, R., 2012. Fractal method for determining the density of the stone tablet in Charak region (southern Iran). *Life Science Journal*. 9(4): 1913–1923. <https://doi.org/10.7537/marslsj090412.290>
- Thorarinsson, F. and Magnusson, S.G., 1990. Bouguer density determination by fractal analysis. *Geophysics*, 55(7): 932–935. <https://doi.org/10.1190/1.1442909>
- Wang, Q., Deng, J., Liu, H., Wang, Y., Sun, X. and Wan, L., 2011. Fractal models for estimating

- local reserves with different mineralization qualities and spatial variations. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(3): 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.02.008>
- Wei, Sh. and Pengda, Zh., 2002. Theoretical study of statistical fractal model applications to mineral resource prediction. *Computers and Geosciences*, 28(3): 369–376. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00052-8)
- Zuo, R., and Wang, J., 2016. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration*, 164: 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.010>
- Zuo, R., Carranza, E.J.M. and Wang, J., 2016. Spatial analysis and visualization of exploration geochemical data. *Earth-Science Reviews*, 158: 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.04.006>

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



How to cite this article

Sadmohammadi, N., Mehrnia, S.R., Rezaei, Kh., Kadioğlu, S. and Honarvar, M., 2021. Application of Variance-Distance exponential model in geochemical studies of zinc calamine ore deposit (Mehdiabad mining complex of Yazd). *Journal of Economic Geology*, 13(2): 411–434. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i2.87140>



Application of Variance-Distance exponential model in geochemical studies of zinc calamine ore deposit (Mehdiabad mining complex of Yazd)

Nasrin Sadrmohammadi^{1*}, Seyed Reza Mehrnia², Khalil Rezaei¹, Selma Kadioğlu³ and Mahmood Honarvar⁴

1) Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran

2) Department of Geology, Faculty of Sciences, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran

3) Department of Geophysical Engineering, Faculty of Engineering, Ankara University, Ankara, Turkey

4) Zap consulting engineers, Tehran, Iran

Submitted: June 01, 2020

Accepted: Jan. 06, 2021

Keywords: *Brownian Surface, Calamine, Zn-Pb mineralization, Variance-Distance model*

Introduction

Calamine Zn-Pb deposit (Mehdiabad, Yazd, Central Iran) is a mineable nonsulfide mineralization, located in the upper part of a volcano-sedimentary basin at intersection with erosion surfaces. From statistical viewpoint, geochemical distributions of trace elements due to volcanic-exhalative processes, may naturally be predominated by self-organized zonation in ore mineralized regions (Cheng et al., 2000; Mehrnia, 2017). Therefore, attention is paid to nonlinear distribution of particular elements to finding their spatial relations with concealed ore mineralization for prospecting sedimentary-hosted exhalative deposit (SEDEX). In this way, calculation and analysis of statistical coefficients is a necessary stage for prospection of the inter-relation of typomorphic elements. In cases where the erosion surfaces result in redistribution of supra ore elements, the approach of linear regression coefficient is not recommended, because progressive weathering usually hides the natural zonality of elements, as an expected criterion for hypogenic mineralization (Hassani-Pak, 2012). Our research approach which is to find a proper zonality of elements is based on nonlinear assessment of geochemical distributions for a case of epigenetic mineralization that seems to be related to deep/concealed SEDEX deposits.

Material and method

Current research uses a variance-distance equation to modify the linear regression results as follows:

$$\text{Log}(V_x) = \text{FD} \text{Log}(D_{vx}) \quad (1)$$

where $\text{Log}(V_x)$ and $\text{Log}(D_{vx})$ are the logarithms of variances and distances respectively; and FD is the fractal dimension. A log-log plot is used to illustrate V_x and D_{vx} changes on horizontal (X) and vertical (Y) axes to obtain a distribution's density function. By statistical concepts, FD is an independent variable from the central tendencies as well as distribution parameters. Meanwhile, a self-organizing property of geochemical distributions is geometrically dependent on fractal dimension changes on power-law's log-log plots. For obtaining the natural geochemical zonation of Calamine's path-finder elements, a set of litho-geochemical data has been used. Consequently, a total of 180 litho-samples of Calamine region were collected and interpolated to find the anomalous populations.

A GIS-based software (Spatial Analyst) was used here to obtain geometric and statistical quantities which are necessary for variance-distance equation (Teymoorian-Motlagh et al., 2012). This software works on ArcMap with the ability to export summarized data to other supplementary software packages such as Excel which are used to complete and present V-D log-log plots.

*Corresponding author Email: nasrin_sadrmohammady@yahoo.com

At the second step, we used fractal dimension changes to identify the Brownian surfaces of elements. This surface usually contains a set of paragenetic elements which are found together within several correlated zonations with respect to their rate of activities in magmatic environments. A Brownian surface is formed of particular geometric locations of self-similar populations. When it changes between $2.5 > FD > 2$, it represents scale-invariant continuity of distributions (Thorarinsson and Magnusson, 1990). In other word, this surface denotes the tendency of trace-elements to nonlinear distributions and it is geometrically related to a probable phase of mineralization in some epigenetic ore deposits.

Discussion

Based on a variance-distance model for Calamine's indicative and path-finder elements, six target areas are presented in a contoured prognostic map, which contains As, Zn, Cr, Sb, S, Co, Cu, Pb, Ni and Ag in a sequent. Order of this sequent is based on geometry of their Brownian surfaces. The largest surface belongs to As while the smallest one belongs to Ag and Cd. Among the elements which have reached the Brownian surface, As, Sb and Zn shared similar fractal parameters and extended at the background of other elements. Cr was the only element which did not follow the As, Sb and Zn backgrounds, because its geometrical location is independent of other elements. The mentioned target-areas which are marked on the prognostic map, have different scoring of mineralization potentials that is prioritized by considering zonation peculiarities of elements on fractal surfaces.

Results

Fractal relationship of elements is conceptually different from what is generally stated in statistical models. Therefore, many elements which have desirable linear correlation with each other

(relatively good condition for path-finding), are unfavorable as V-D models and vice versa. From a nonlinear perspective, a Poisson distribution is the most important criterion for analyzing coherency of elements in hypogenic environments. As a final result, we have illustrated that Brownian surfaces in As, Zn and Sb are extended well in the central and southeastern parts of Calamine, marking a proper relation of the structures with the host units during exhalative activities of the region. The high amount of these elements compared to the background indicates the effect of fluid flows and the penetration of mineralizing solutions under a supergene condition of the mine as well opening the fractures and fault systems.

References

- Cheng, Q., Xu, Y. and Grunsky, E., 2000. Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research* 9(1): 43–51. <https://doi.org/10.1023/A:1010109829861>
- Hassani-Pak, A.A., 2012. Principles of geochemical exploration. University of Tehran Publication, Tehran, 615 pp. (in Persian)
- Mehrnia, S.R., 2017. Application of Fractal Technique for Analysis of Geophysical - Geochemical Databases in Tekieh Pb-Zn Ore Deposit (SE of Arak). *Journal of Economic Geology*, 8(2): 325–342. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v8i2.42454>
- Teymoorian-Motlagh, A., Ebrahimzadeh-Ardestani, V. and Mehrnia, R., 2012. Fractal method for determining the density of the stone tablet in Charak region (southern Iran). *Life Science Journal*. 9(4): 1913–1923. <https://doi.org/10.7537/marslsj090412.290>
- Thorarinsson, F. and Magnusson, S.G., 1990. Bouguer density determination by fractal analysis. *Geophysics*, 55(7): 932–935. <https://doi.org/10.1190/1.1442909>