



استفاده از مدل‌سازی فرکتالی برای پردازش و تحلیل مؤلفه‌های ژئوالکتریک در مقاطع سطحی کانسار مس کوشک بهرام (ایران مرکزی)

مرجان جبلی^{۱*}، سید رضا مهرنیا^۲ و پیمان افضل^۳

(۱) باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(۳) گروه مهندسی نفت و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱

چکیده

کانسار مس کوشک بهرام واقع در شمال‌خاوری ساوه (ایران مرکزی)، بخشی از بهنه فرورانش ارومیه-دختر است که بر اساس پیشینه‌های اکتشافی و شواهد زمین‌شناسی منطقه، به عنوان ذخیره سولفیدی نوع مانتو معرفی شده است. در این پژوهش که برای کاهش احتمال خطر سرمایه‌گذاری در فاز اکتشاف تفصیلی انجام شده است، ارتباط داده‌های ژئوفیزیکی با آثار سطحی کانه‌زایی، دگرسانی و گسل از دیدگاه فرکتالی بررسی و جدول‌های به دست آمده از برداشت سه پروفیل P1، P2 و P3، با استفاده از معادله پراش-مسافت، بازخوانی و پردازش شده‌اند. در این روش، پس از شناسایی و تفکیک سطح توزیع براونی ($FD > 2$)، امکان تدقیق و تلفیق کمیت‌های ژئوالکتریک فراهم شده است. نتایج پژوهش به تولید دو نقشه پیش‌داوری بر پایه توزیع فرکتالی مقاومت ویژه، بارپذیری الکتریکی و پتانسیل خودزا منجر شد که در آنها، مناطق امیدبخش معدنی با در نظر گرفتن مکان هندسی سطوح توزیع براونی RS، IP و SP اولویت‌بندی شده‌اند. بازخورد توزیع فرکتالی کمیت‌های ژئوالکتریک در سطح اکتشافی کوشک بهرام متفاوت است؛ به طوری که در محدوده پروفیل‌های P1 و P2، مقاومت ویژه الکتریکی با تغییر بعد $FD=2.78$ ، به سطح آرمانی خود رسیده‌اند و سایر کمیت‌های ژئوالکتریک در شرایط مرزی هستند (بعد فرکتالی کوچک‌تر از ۲ دارند). اما در محدوده پروفیل P3، شاهد خودسامان‌دهی کمیت بارپذیری الکتریکی در $FD=2.06$ هستیم و مقاومت ویژه الکتریکی، ویژگی‌های شبه فرکتالی دارد ($FD=1.85$).

واژه‌های کلیدی: روش فرکتالی پراش-مسافت، بعد فرکتالی، کانسار مس مانتو کوشک بهرام

مقدمه

۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه قرارگرفته است که از لحاظ موقعیت

زمین‌شناسی، در زون ایران مرکزی و در کمربند ماگمایی

کانسار مس نوع مانتو کوشک بهرام، تقریباً در مرکز بر گه

استفاده می‌شود. لذا در پروفیل‌هایی که حجم نقاط اندازه‌گیری کم بوده و محدودیت‌هایی برای توسعه پروفیل‌ها وجود دارد، شاخص‌های آماری متأثر از دامنه یا مقادیر اکسترمم تابع هستند که این امر موجب افزایش خطای سیستماتیک خواهد شد. برای کاهش این خطا و رفع ابهام از تغییرات کمی مقاطع ژئوالکتریک، استفاده از روش‌های فرکتال توصیه شده است (Turcotte, 1997). ویژگی مهم روش‌های فرکتالی، مستقل بودن الگوی توزیع کمیت‌ها از مقیاس برداشت‌های ژئوفیزیکی است. همچنین در روابط نمایی آن احتمال ظهور سطح توزیع اجزای متناظر در فاصله معینی از مرکز بی‌هنجاری وجود دارد. ویژگی نخست این سطح آن است که مؤلفه‌های هندسی آن مستقل از مقیاس پیمایش بوده و تابع تغییرات بعد فرکتال هستند. ویژگی دیگر این سطح، فراوانی مؤلفه‌های متناظر (خودتشابهی) با تمایل به خودسامان‌دهی در روند خاصی از توزیع است که مورد اخیر منسوب به پدیده‌های طبیعی بوده و از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی با تشکیل ذخایر معدنی درون‌زاد سنخیت دارد (Mehrnia, 2013; Mehrnia, 2016; Mehrnia and Turcotte, 2019). طبق نتایج پژوهش تورکت (Turcotte, 1997)، در اغلب کمیت‌های ژئوفیزیکی (نظیر داده‌های گرانی، مغناطیسی و ژئوالکتریک)، امکان استفاده از روابط فرکتال برای تشخیص سطح توزیع براونی^۱ وجود دارد. مشاهده این سطح به منزله سازگار بودن بخشی از توزیع با شرایط حاکم بر حاشیه محیط‌های آشوبناک^۲ است که به شرط مطابقت با حدود آستانه یا بی‌هنجاری، به عنوان معیار مرتبط با رویداد کانه‌زایی قلمداد می‌شود (شکل ۱).

زمین‌شناسی

واحدهای سنگی منطقه، متعلق به توده‌های آتشفشانی ائوسن و الیگومیوسن در بخش میانی پهنه فرورانش ارومیه دختر بوده و در راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی قرار دارند (شکل ۲). سازندهای آتشفشانی کوشک بهرام شامل آندزیت،

ارومیه - دختر قرار گرفته که شامل کانسارهای پورفیری مس - مولیدن ± طلا و انواع کانی‌سازی مرتبط با آن از جمله مس نوع مانسو است (Shahabpour and Kramers, 1987; Boomeri et al., 2010; Jebeli et al., 2018a; Jebeli et al., 2018b). از کانسارهای مهم شناسایی شده می‌توان به کوشک بهرام و کوه‌پنگ اشاره کرد.

فراوانی کمپلکس‌های سولفیدی و همیافتی و سبب فلزهای واسطه در بازه عناصر میان کانساری (مانند مس و عناصر همراه آن)، نقش کلیدی در ایجاد تغییرات قطبش الکتریکی دارد. از طرف دیگر، بخشی از سنگ میزبان حاوی مس در ذخایر نوع مانتو، تحت تأثیر عوامل دگرسانی بوده و موجب افت و خیزهایی در کمیت مقاومت ویژه الکتریکی می‌شود. این تغییرات در محل پیدایش و تجمع کانه‌های سولفیدی افزایش یافته و مقاطع ژئوالکتریک با درجه‌های رسانایی مختلف را به وجود می‌آورد. بنابراین، شناسایی زون‌های امیدبخش نوع مانتو با استفاده از این مقاطع امکان‌پذیر است (Bayram and Selesnick., 2009). با توجه به نوع کانی‌سازی مس مانتو و حضور سولفیدها با بارپذیری الکتریکی بالا و نیز مقاومت ویژه الکتریکی پایین در این نوع کانسار و افزایش سطح تماس، روش‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی برای بررسی‌های ژئوفیزیکی کانسار کوشک بهرام انتخاب شده است.

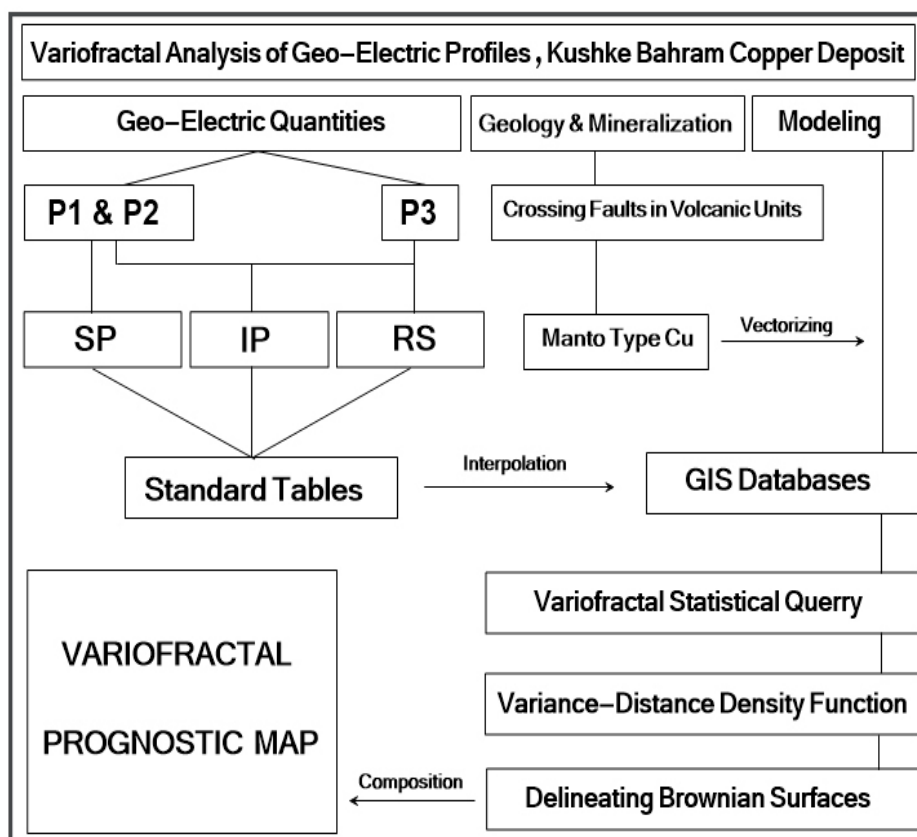
در کانسارهای مس نوع مانتو (مانند کوشک بهرام) که به دلیل حضور قابل توجه کانه‌های سولفیدی از درجه رسانایی بالایی برخوردارند، از دو روش سنجش مقاومت ویژه و قطبش القایی الکتریکی برای ارزیابی پیکره‌های معدنی استفاده می‌شود (Mehrnia, 2013, Mehrnia, 2016; Teymoorian) (Motlagh et al., 2012). منطق روش‌های آمار کلاسیک، برای پردازش اطلاعات به دست آمده از مقاطع ژئوالکتریک، مبتنی بر محاسبه شاخص‌ها و آماره‌هایی است که در همه آنها از تغییرات میانگین یا میانه در مقابل تغییرات انحراف معیار داده‌ها برای شناسایی و تفکیک مقادیر زمینه، آستانه و بی‌هنجاری

1. Brownian Surface

2. Edge of Chaos

دگرسانی‌های گرمایی کانسار کوشک بهرام شامل هاله‌های سیلیسی، سیریسیتی، کربناتی، اپیدوتی، کلریتی، هماتیتی و ژاسپروئیدی هستند (Jebeli et al., 2018a).

تراکی آندزیت، لاتیت آندزیت، لاتیت بازالت، ریولیت، داسیت، گابرو، دیوریت و توف شیشه‌ای است. کانی‌سازی مس منطقه کوشک بهرام از نوع ماتو (چینه کران) معرفی شده است (Jebeli et al., 2018a; Jebeli et al., 2018b).



شکل ۱. فلوچارت تحلیل واریو فرکتالی مقاطع سطحی ژئوالکتریک در کانسار مس کوشک بهرام

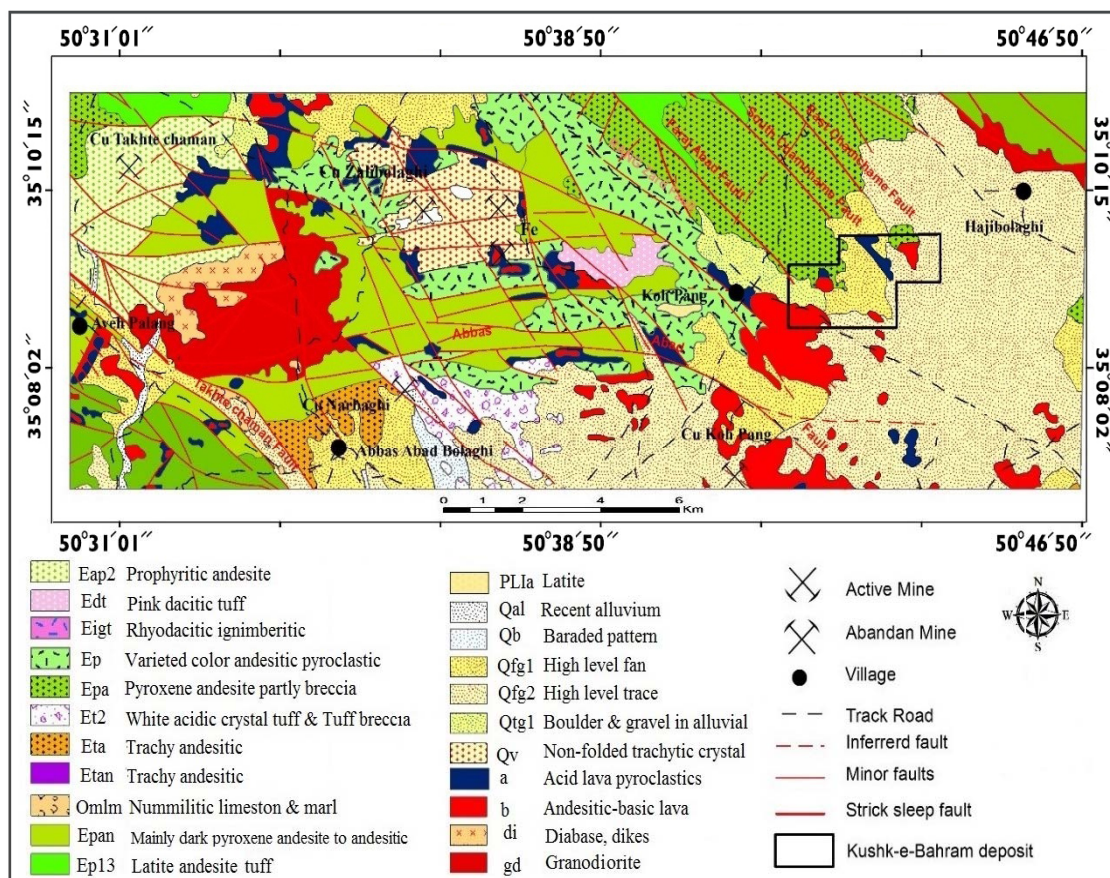
Fig. 1. Flowchart of vario fractal analysis of geoelectric surface sections in Kushk-e-Bahram Cu deposit

کانه‌های فلزی آهن و مس دار شامل پیریت، کالکوپیریت و بورنیت است که بلورها در اندازه‌های ریز تا متوسط در شکل‌های سبب‌هدرال تا انهدرال به صورت پراکنده و همچنین رگه-رگچه‌ای حضور دارند که بلورهای پیریت اغلب توسط هماتیت-گوتیت جانشین شده‌اند و بورنیت و کالکوپیریت توسط کالکوسیت و کوولیت-دیژنیت جانشینی نشان می‌دهند (Jebeli et al., 2018b).

کانه‌زایی

واحدهای دگرسانی به ویژه در نواحی خرد شده زمین‌ساختی (محل برخورد چندین سامانه گسلی)، دارای آثار کانه‌زایی دیرزاد^۱ هستند. بر اساس بررسی‌های مقاطع صیقلی نمونه‌های محدود کوشک بهرام، کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، دیژنیت، کالکوسیت و کانی‌های ثانویه شامل کوولیت، کوپریت، مالاکیت، هیدروکسیدهای آهن شامل مگنتیت، هماتیت، گوتیت هستند. طبق شکل ۳، نمونه حاوی

1. Epigenetic



شکل ۲. موقعیت کانسار مس کوشک بهرام و کانسارهای مس و آهن دیگر بر روی نقشه زمین شناسی ناحیه ای در شمال شرق ساوه عمیدی و همکاران (Amidi et al., 2006)

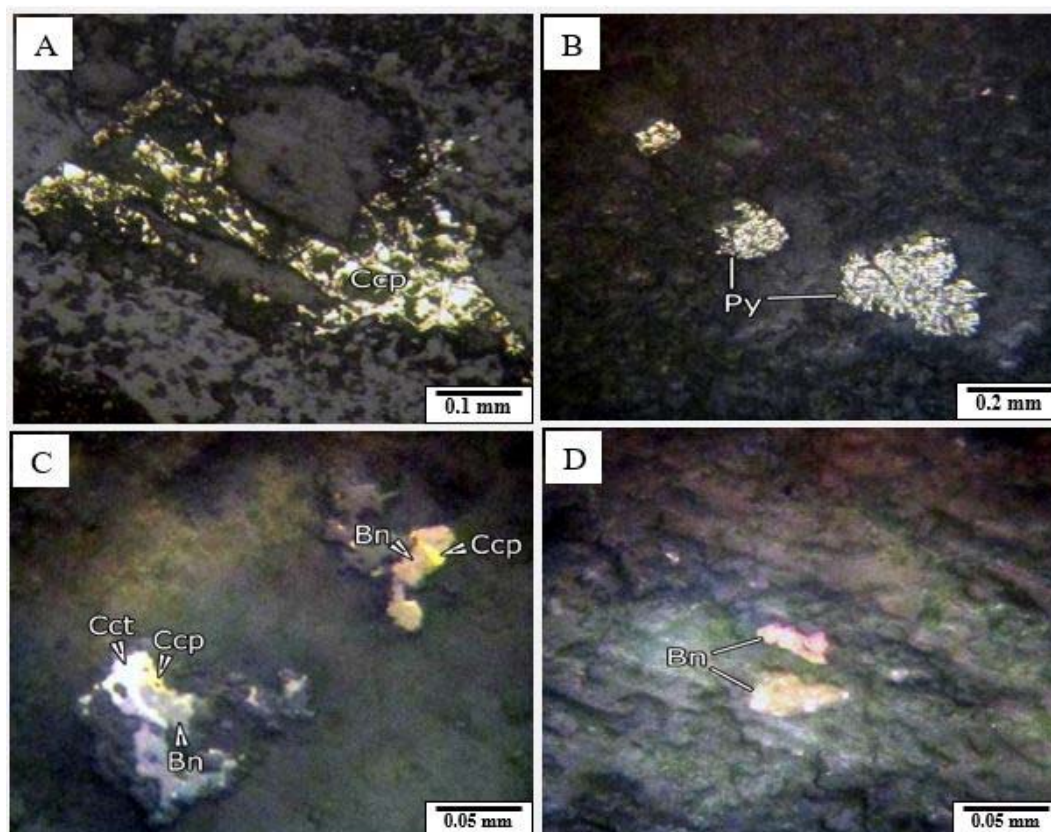
Fig. 2. The location of the Kushk-e-Bahram Cu deposit and other Cu and Fe deposits within simplified regional geologic map of NE Saveh (Amidi et al., 2006)

روش مطالعه

در ارزیابی های ژئوفیزیکی کانسار مس کوشک بهرام، تعیین محل دقیق بی هنجاری های ژئوالکتریک و بررسی رابطه آنها با کانی سازی منطقه در اولویت بوده و برای دستیابی به اطلاعاتی از شکل، ساختار، نظم توزیع ماده معدنی و احتمال گسترش آن در عمق مناطق دگرسانی ضرورت دارد. با توجه به پیشینه های اکتشافی کانسار مس کوشک بهرام (Jebeli et al., 2018a, 2018b) وجود پتانسیل کانی سازی مس به اثبات رسیده است. برای مثال، در شکل ۳، نمونه هایی از کانسار مس کوشک بهرام آورده شده است که در قسمت A، رگچه کالکوپیریت، در

قسمت B، نمایی از بلورهای ساب هدرال و انهدرال پیریت دیده می شود و همچنین در قسمت C، بلورهای بورنیت و کالکوپیریت توسط کالکوسیت جانشین شده و در قسمت D، نمایی از بلورهای بورنیت مشاهده می شود؛ لذا انتخاب مناطق امیدبخش معدنی با تأکید بر پژوهش های پیشین و پردازش های مورد نیاز در محیط جی آی اس^۱ صورت گرفته است. شکل ۴، موقعیت پروفیل های انتخاب شده را بر روی نقشه زمین شناسی منطقه نشان می دهد. چنانچه ملاحظه می شود، امتداد پروفیل های سطحی، عمود بر ساختمان های گسلی و سنگ میزبان آتشفشانی (حاوی آثار دگرسانی گرمایی و کانه زایی مس)، انتخاب شده اند.

1. GIS



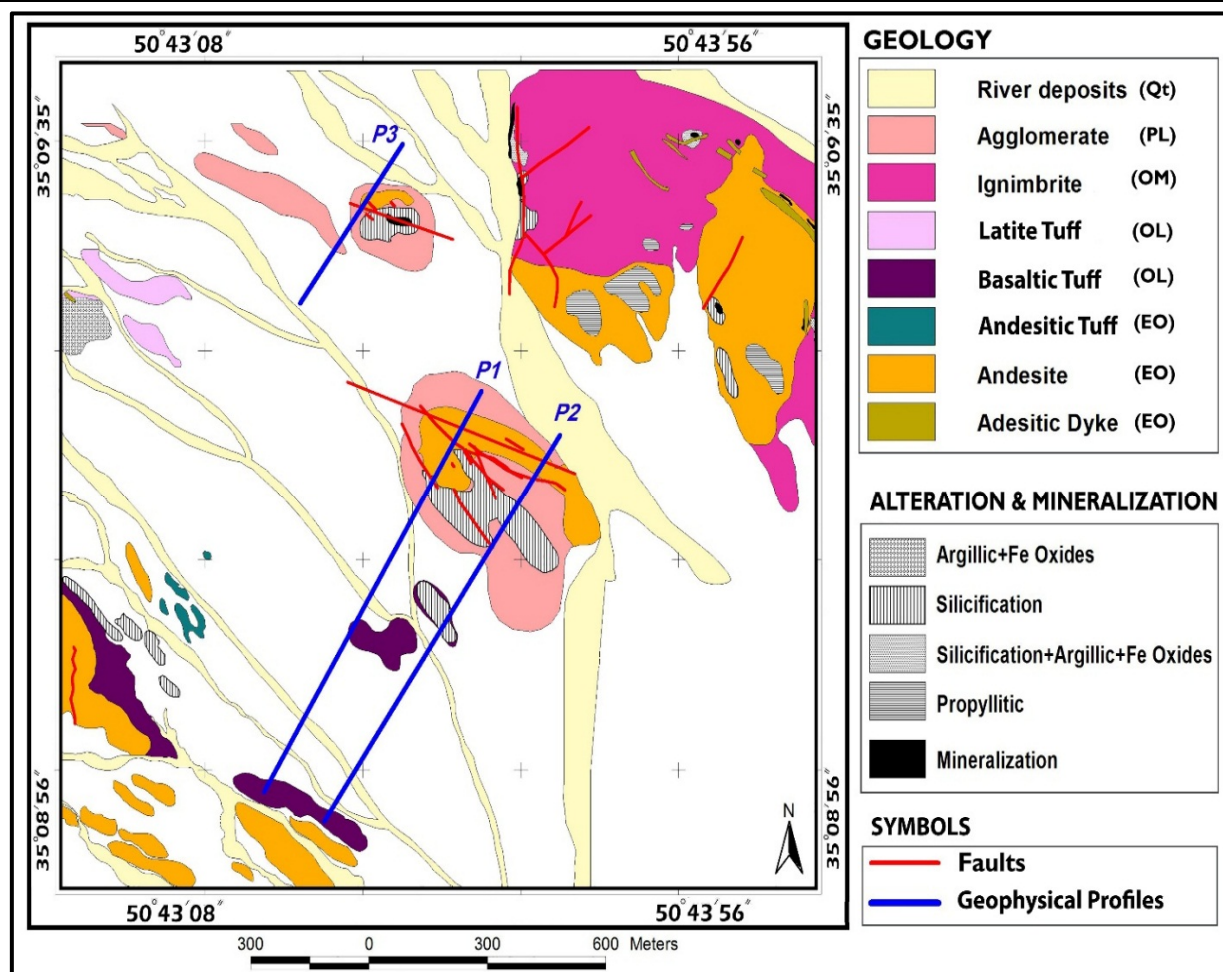
شکل ۳. تصاویر میکرو سکویی از انواع کانه‌های اولیه و ثانویه در کانسار مس کو شک بهرام (در نور (XPL)، A: رگچه کالکوپیریت، B: بلورهای ساب‌هدرال و انهدرال پیریت، C: بلورهای بورنیت و کالکوپیریت توسط کالکوسیت جانشین شده و D: بلورهای بورنیت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Bn: بورنیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت).

Fig. 3. Microphotographs of primary and secondary ore minerals in the Kushk-e-Bahram Cu deposit (XPL), A: chalcopyrite vein, B: anhedral to subhedral pyrite, C: fine-grained bornite and chalcopyrite crystals with chalcocite, and D: Bornite crystals. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Bn: Bornite, Py: pyrite, Ccp: Chalcopyrite, Cct: Chalcocite).

اطلاعات پایه

و راستای آرایه‌های دو قطبی، بررسی‌هایی بر اساس محل ترانشه‌ها و توالی زمین‌شناسی - کانی‌سازی منطقه انجام شده است که بر اساس آن، دو پروفیل P1 و P2 با طول تقریبی یک کیلومتر و پروفیل P3 با طول تقریبی ۳۷۰ متر تحت آزمایش ۳۰ درجه طراحی و برداشت شدند (شکل ۴). در کلیه آرایه‌های دو قطبی - دوقطبی، فاصله الکترودهای جریان، پتانسیل و طول گام‌ها ۱۰ متر بوده است. در جدول ۱، مشخصات پروفیل‌ها و مؤلفه‌های به کار رفته در آرایه‌های الکترودی درج شده‌اند. چنانچه ملاحظه می‌شود، بیشترین نقاط برداشت سطحی در امتداد پروفیل P1 و کمترین آن در امتداد پروفیل P3 بوده است.

سنجش تغییرات سطحی مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی کانسار کو شک بهرام، توسط شرکت حدیدگستر سیرجان، در طول سه پروفیل (P1, P2, P3) و تحت آرایش الکترودی دوقطبی - دوقطبی با فاصله الکترودی ۱۰ متر انجام شده است (Jebeli et al., 2018b). دستگاه مورد استفاده از نوع WDJD-3 و تعداد نقاط برداشت بیش از ۱۶۲۰ نقطه است. برای شناسایی نواحی کانی‌سازی بر اساس بیشترین تغییرپذیری ویژگی‌های رسانایی و بارپذیری، نیم‌رخ‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه با آزمایش ۳۰ تا ۴۰ درجه و عمود بر روند کانی‌سازی منطقه طراحی و پیمایش شدند. برای تعیین آزمایش



شکل ۴. موقعیت پروفیل‌ها بر روی نقشه زمین‌شناسی کانسار مس کوشک بهرام

Fig. 4. Profiles location on geological map of Kushk-e-Bahram Cu deposit

جدول ۱. ویژگی‌های پروفیل‌های برداشت‌شده در کانسار مس کوشک بهرام

Table 1. Databases of profiles in the Kushk-e-Bahram Cu Deposit

Profile name	Profile length (m)	Number of measuring points	Electrode distance (m)	Step length (m)
P1	1000	1105	10	10
P2	1000	305	10	10
P3	370	213	10	10

روش فرکتالی پراش - مسافت

روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال نخستین بار بر پایه ارتباط معکوس بین متغیر ناحیه‌ای و مکان هندسی مربوطه پایه‌گذاری

شد (Mandelbrot, 1983; Afzal et al., 2018, Afzal et al., 2019). نخستین رابطه، تابع نمایی بین پراش (واریانس) و مسافت اثر پراش با هدف بررسی تغییرات سطح بی‌هنجاری‌های

گرانشی با معادله زیر است (Mark and Aronson, 1984):
 رابطه ۱: $E [(ZP - Zq)^2] = (dpq)^{2H}$
 در رابطه ۱، منظور از ZP و Zq به ترتیب تغییرات میدان ژئوفیزیکی در دو نقطه مفروض p و q واقع بر سطح بی‌هنجاری است و dpq فاصله افقی بین نقاط برحسب متر است. چنانچه مشاهده می‌شود، امید ریاضی E در عبارت $(ZP - Zq)^2$ با مسافت dpq متناسب و رابطه آنها از نوع نمایی با توان $2H$ است؛ به طوری که:
 رابطه ۲: $2H = 3 - FD$
 با استنباط از مفاهیم آمار کلاسیک، امید ریاضی جمله $E [(ZP - Zq)^2]$ به دلیل وجود متغیرهای تصادفی با مفهوم پراش حاصل از تغییرات ژئوفیزیکی در Zp و Zq متناسب است. یعنی می‌توان نوشت:
 رابطه ۳: $E [(ZP - Zq)^2] = \sum (Z_i - Z) / N$
 که در عبارت $\sum (Z_i - Z) / N$ منظور از Z_i مقدار نقطه‌ای مؤلفه و Z میانگین شدت میدان برای N برداشت متمایز از سطح بی‌هنجاری است. نتیجه به دست آمده از رابطه‌های ۱، ۲ و ۳، بیانگر وجود ارتباط تابع نمایی بین پراش حاصل از تغییرات و مسافت اثر بی‌هنجاری‌ها با توان $2H$ و بعد فرکتال است. شرط لازم برای دستیابی به کمیت‌های رابطه ۳، درون‌یابی میدان‌های ژئوفیزیکی برای ایجاد پیوستگی در شبکه آرایه‌های اکتشافی بوده و شرط کافی آن، استفاده از مختصات لگاریتمی برای دستیابی به ضریب زاویه خط FD است:

رابطه ۴: $\log(Vz) = FD \log(Dz)$
 در رابطه اخیر، منظور از $\log(Vz)$ و $\log(Dz)$ به ترتیب لگاریتم‌های پراش و فاصله اثر پراش از مرکز بی‌هنجاری است و منظور از FD بعد فرکتال است که تغییرات آن موجب تغییر نقاط هم‌استقامت و گوناگونی جوامع متناظر می‌شود. با رسم تابع تغییرات لگاریتم V در برابر لگاریتم D ، بعد فرکتال نشان‌دهنده تمایل جامعه برای شکل‌گیری نقاط هم‌توان و در پی آن، پیدایش مؤلفه‌های متناظر در واحد سطح بی‌هنجاری است (Mark and

رابطه پراش - مسافت برای آن دسته از نقاط بی‌هنجاری که بعد فرکتالی آنها بین ۲ و ۳ باشد، مصداق دارد؛ زیرا در چنین برد پیوسته و معینی از متغیرهای تصادفی، شرایط آرمانی برقرار است؛ به طوری که با ظهور و افزایش کوارتز کلوفرمی (شاخص خودسامان‌دهی بافتی در ذخایر اپی‌ترمال)، بعد فرکتالی سیلیس (SiO_2) بیشتر شده و عیار طلا افزایش می‌یابد (Mehrnia, 2013).

بسته نرم‌افزاری اسپشال آنالیز^۳ و الگوریتم به کار رفته در تابع توزیع پراش - مسافت، بازخوانی، تدقیق و درون‌یابی شده‌اند. با توجه به موقعیت پروفیل‌های P1 و P2، هر سه کمیت مقاومت ویژه الکتریکی^۴، قطبش القایی^۵ و پتانسیل خودزای الکتریکی^۶، برای مطابقت با آثار دگرسانی و گسل‌های منطقه مورد بررسی، درون‌یابی شده‌اند (شکل‌های ۵ و ۶). در محدوده P3، کمیت پتانسیل خودزا اندازه‌گیری نشده و تنها به درون‌یابی تغییرات ویژه الکتریکی و قطبش القایی و مطابقت آنها با آثار دگرسانی و گسل‌های منطقه بسنده شده است (شکل ۷).

درون‌یابی داده‌های ژئوالکتریک به روش وزن‌دهی در فاصله‌های معکوس بوده و از الگوریتم نزدیک‌ترین نقاط همسایگی استفاده شده است (Teymoorian Motlagh et al., 2012; Mehria, 2016).

ارزیابی اولیه در امتداد پروفیل‌های P1، P2 و P3، بیانگر وابستگی تغییرات ژئوالکتریک به مکان گسل‌ها و آثار دگرسانی منطقه است. از این رو، در نواحی خرد شده^۷، شاهد افت مقاومت ویژه و افزایش نسبی سایر کمیت‌های ژئوالکتریک هستیم که از نشانه‌های ذخایر ماگمایی - گرمایی در سامانه هیدروترمال است. از دیدگاه زمین‌شناسی:

الف) افت مقاومت ویژه در پروفیل‌های P1 و P2، به دلیل تغییرات رسانایی الکترولیتی (وجود آب در لایه‌های زیرین) یا الکترونی (کانه‌زایی) است. با توجه به تعدد مناطق دگرسانی و ارتباط آنها با گسل‌ها و مناطق خرد شده زمین‌ساختی (شکل‌های ۵، ۶ و ۷)، احتمال کاهش مقاومت ویژه الکتریکی در اثر فرایند کانه‌زایی دور از انتظار نیست. چنین استنباطی در مورد تغییرات مقاومت ویژه اطراف P3 صدق نمی‌کند؛ زیرا علاوه بر نبود پتانسیل خودزای الکتریکی، آثار گسل و دگرسانی آن کمتر از پروفیل‌های P1 و P2 است.

در پژوهش موردی دیگری که بر روی گنبد‌های نمکی زاگرس انجام شده است، مکان هندسی تغییرات گرانی با استفاده از معادله پراش - مسافت بازبینی و به صورت مستقل از نوفه‌های ارتفاعی بررسی شده است (Mehria, 2013).

مراحل دستیابی به تابع فرکتالی پراش - مسافت عبارتند از:

- درون‌یابی داده‌ها با استفاده از روش‌های زمین‌آماري با هدف تولید نقشه شبکه و رده‌بندی دوباره داده‌ها برای بهنجارسازی متغیرها و استخراج شاخص‌های آماری به روش زون‌بندی مجموع^۱.

- تولید جدول‌های آماری مشتمل بر مقادیر کمی سطوح بی‌هنجاری (بر حسب متر یا کیلومتر مربع) و شدت تغییرات متناسب با هر سطح (بر حسب واحد کمیت ژئوفیزیکی) برای دستیابی به کمیت‌های Z_p ، Z_q و d_{pq} در محیط اکسل^۲.

- تکمیل مؤلفه‌های جدول شامل سطح تجمعی بی‌هنجاری‌ها، تغییرات لگاریتمی داده‌ها و محاسبه پراش داده‌ها طبق رابطه ۱.

- رسم نمودار تغییرات لگاریتمی - چگالی پراش در برابر مسافت.

- شناسایی نقاط هم‌توان (هم‌استقامت) بر روی تابع چگالی پراش - مسافت.

- بررسی تغییرات بعد فرکتال (به روش جزئی و کلی) با هدف شناسایی جوامع بی‌هنجاری از زمینه.

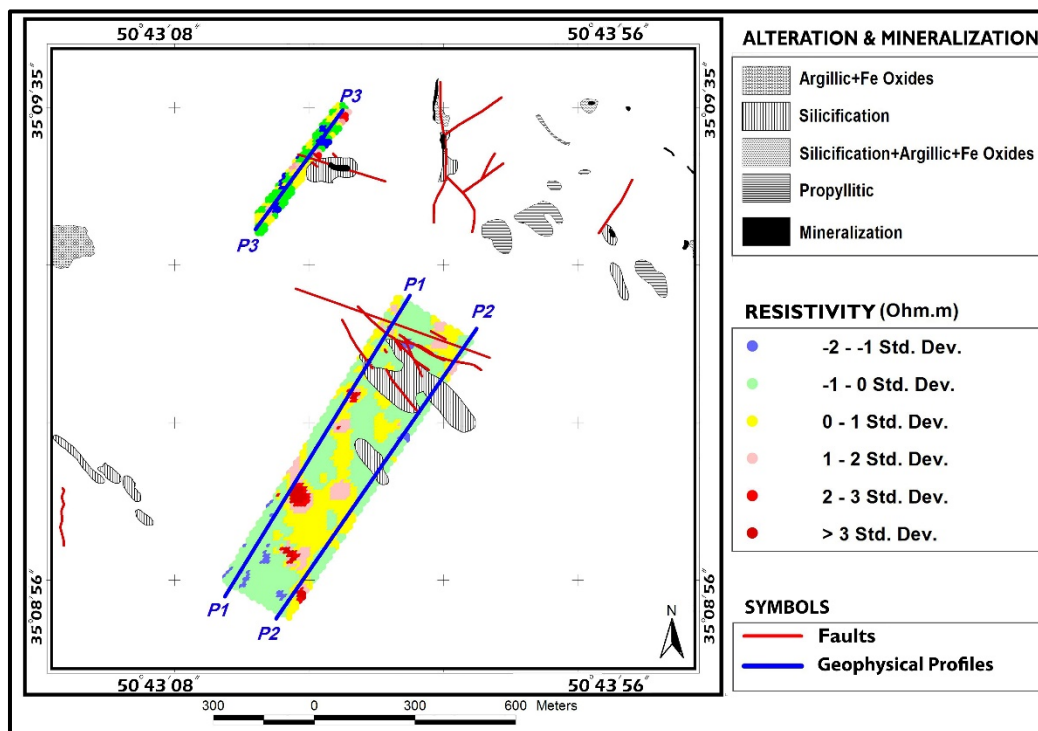
- تشخیص سطح توزیع براونی در محدوده بعد فرکتال بین ۲ و ۳.

بحث و بررسی

در این پژوهش، با در نظر گرفتن پیشینه اکتشافی منطقه مورد بررسی (Jebeli et al., 2018a)، تعدادی از مقاطع ژئوالکتریک (که توسط شرکت حدیدگستر سیرجان برداشت شده است)، انتخاب و تغییرات سطحی آنها در محیط دوبعدی، با استفاده از

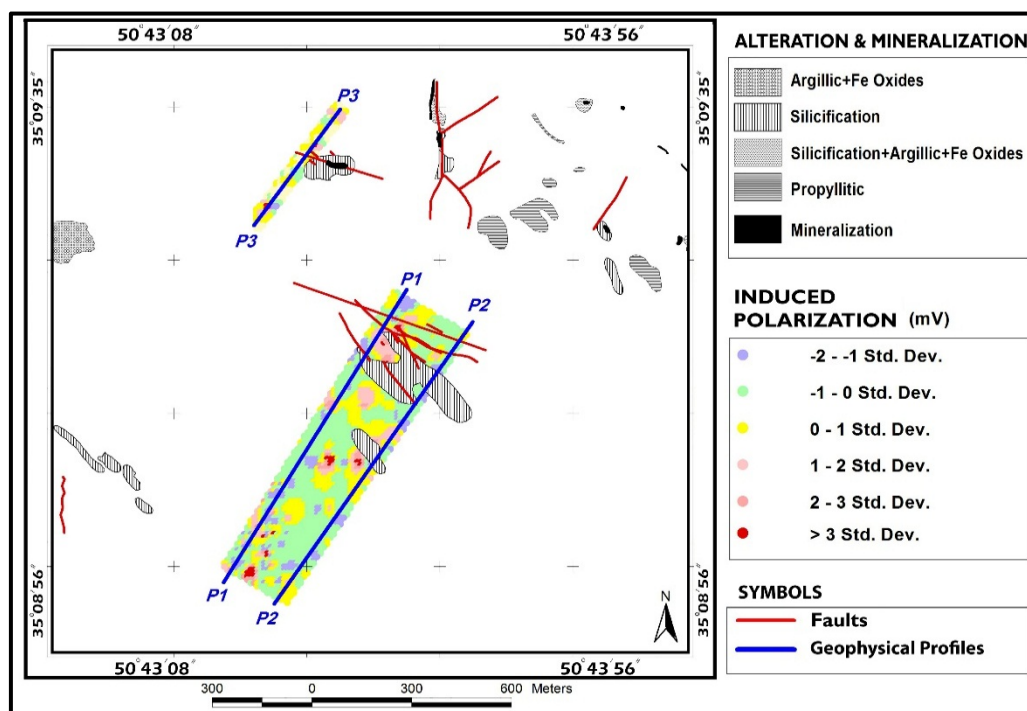
1. Summarizing Zonation
2. Excel
3. Spatial Analyst
4. Electrical resistivity

5. Induced Polarization
6. Electrical self-Potential
7. Crushed Zones



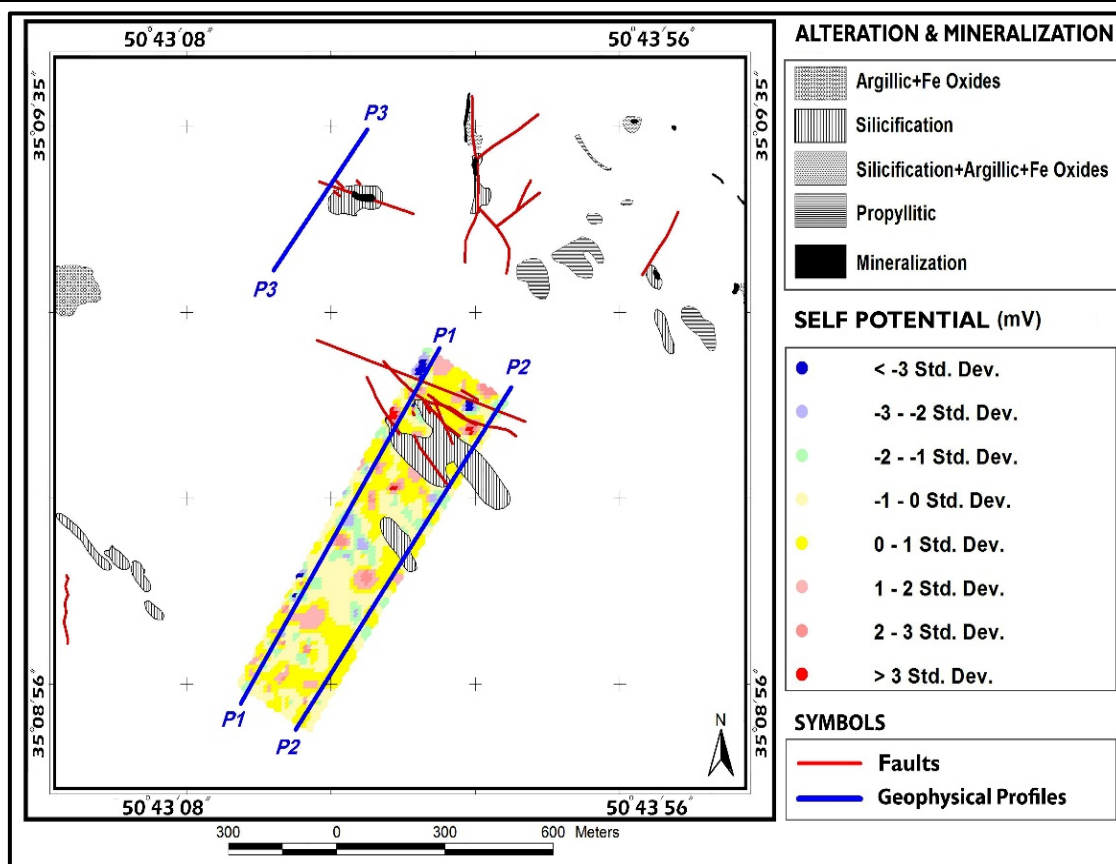
شکل ۵. رابطه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی با گسل‌ها و آثار دگرسانی کانسار مس کوشک بهرام در امتداد تمام پروفیل‌ها

Fig. 5. Relation of electrical resistivity changes with faults and effects of alterations along all profiles in the Kushk-e-Bahram Cu deposit



شکل ۶. رابطه تغییرات قطبش القای الکتریکی با گسل و آثار دگرسانی کانسار مس کوشک بهرام در امتداد هر سه پروفیل

Fig. 6. Relationship of changes of electrical induced polarization with faults and effects of alterations along all profiles in the Kushk-e-Bahram Cu deposit



شکل ۷. رابطه سطحی تغییرات پتانسیل خودزای الکتریکی با گسل‌ها و آثار دگرسانی کانسار مس کوشک بهرام در امتداد پروفیل‌های P1 و P2
Fig. 7. Surface relationship changes in electrical self-potential induction with faults and effects of alterations along P1 and P2 profiles in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

زمین ساخت کانسار کوشک بهرام، نشان‌دهنده توسعه مناطق دگرسانی گرمابی (آرژلیک، سیلیس و پروپیلیتیک) در سازندهای ایگنمبریتی و رخنمون‌های آندزیتی منطقه بوده و افت مقاومت ویژه به همراه افزایش نسبی قطبش القایی و پتانسیل خودزای الکتریکی، ناشی از تغییرات الکترولیتی یا الکترونی سنگ میزبان است. شناسایی و تفکیک انواع رسائیمی، یکی از چالش‌های پیش روی اکتشافات ژئوالکتریکی است که برای روبه‌رو شدن با آن، نیازمند استفاده از روش‌هایی است که بیش از آمارهای توزیع، به نظم داده‌ها و توالی ذاتی آنها توجه داشته باشد. بر این اساس، استفاده از روش‌های غیرخطی نظیر معادلات فرکتال برای درک توزیع پواسونی کمیت‌ها اهمیت داشته و از تفاوت‌های بنیادی نسبت به روش‌های کلاسیک برخوردار است.

ب) تغییرات زمینه و آستانه قطبش القایی در هر سه پروفیل اکتشافی، منطبق بر هاله دگرسانی سیلیس (ژاسپروئید) بوده و افزایش قطبش القایی محدود به مناطق خرد شده زمین‌ساختی است. در چنین مناطقی، چنانچه افزایش قطبش القایی با افت مقاومت ویژه الکتریکی همراه باشد، نشانه کانه‌زایی پراکنده در سنگ میزبان آتشفشانی است.

ج) در سطح هم‌پوشانی P1 و P2، تغییرات آستانه پتانسیل خودزای الکتریکی مشهود و منطبق بر محل تلاقی گسل‌هاست. افزایش پتانسیل خودزای الکتریکی ممکن است به دلیل کانه‌زایی رگه‌ای با بافت متراکم باشد که از لحاظ مکانی با ناحیه توسعه آبخوان‌ها ارتباط دارد.

نتیجه انطباق داده‌های ژئوالکتریکی با شواهد زمین‌شناسی و

محدود به آستانه محلی است (۳۲ تا ۳۸ میلی ولت). لذا با توجه به نموداری که در زیر جدول ۲ رسم شده است، تغییرات قطبش القایی به ظهور جوامع متناظر منجر نشده و بدون سطح توزیع براونی است (توزیع قطبش القایی در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲، از نوع خطی است و تمایلی به ایجاد الگوهای تکرارپذیر ندارد). از آنجا که بین تغییرات رسانایی و افزایش عمق ماده معدنی در ذخایر اپی ژنتیک، رابطه معناداری برقرار است؛ تغییرات قطبش القایی در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲ به بلوغ کافی نرسیده و بیانگر کانه‌زایی پراکنده نیست.

در عمل، پس از رده‌بندی پربندی‌های ژئوالکتریک و استخراج آماره‌های لازم برای تولید مدل پراش - مسافت، فایل داده‌های جدول از محیط آرک جی‌آی‌اس^۱ به محیط اکسل منتقل و تجمعی آن محاسبه شده است. در ادامه لگاریتم شعاع اثر این سطح به عنوان معیار هندسی متناسب با تغییرات بعد (dpq) محاسبه و در مقابل لگاریتم تغییرات پراش (Zq - Zp) قرار گرفته است (جدول‌های ۲ تا ۶). بر اساس اطلاعات جدول ۲، تغییرات قطبش القایی در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده روند خطی^۲ است که ملاک مؤثری برای شروع فرایند خود سامان‌دهی محسوب نمی‌شود و

جدول ۲. کمیت‌های تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات قطبش القایی در پروفیل‌های ۱ و ۲، کانسار مس کوشک بهرام

Table 2. Variance-Distance function quantities in exchange for induced polarization along P1 and P2 profiles in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

NO	Area (m ²)	IP (mv)	IP Var.	IP Dist.	Log (Var.)	Log (Dist.)	Differential FD	Popular FD	Remarks
1	241000	4.09	1568.94	267.27	3.20	2.43	3.88	3.88	Stochastic
2	214700	8.43	1243.50	251.71	3.09	2.40	0.63		
3	98500	12.67	962.94	167.34	2.98	2.22	0.87		
4	37800	17.88	666.44	109.72	2.82	2.04	0.66	0.77	Pre Linear
5	15900	22.35	455.56	61.39	2.66	1.79	0.94		
6	6100	27.45	263.86	34.30	2.42	1.54	1.02		
7	2200	32.46	126.25	16.70	2.10	1.22	1.38		
8	800	38.03	32.15	6.19	1.51	0.79	1.90	1.48	Post Linear
9	300	43.70	0.00	0.00	0.00	0.00	nd	nd	nd

توجه به شکل ۸-A و B)، نمودار تابع پراش - مسافت رسم شده است، این تغییرات به پیدایش جوامع متناظر منجر شده و با روند خطی ادامه یافته است.

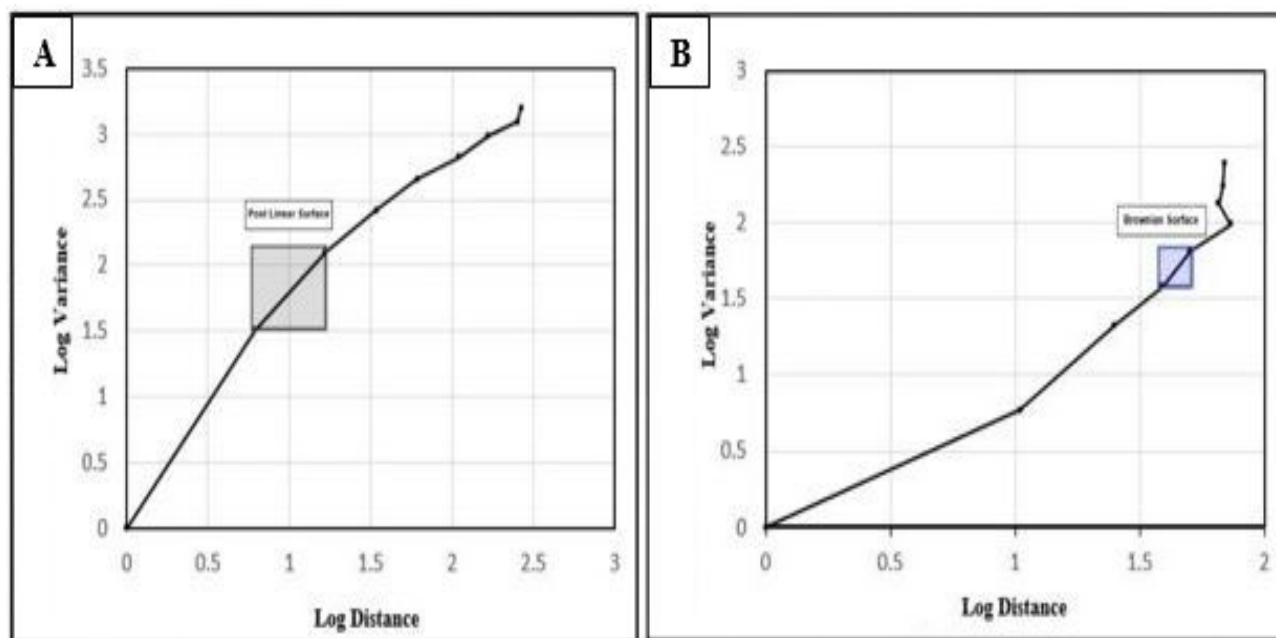
در جدول ۳، تغییرات قطبش القایی متناسب با پروفیل ۳ نشان داده شده است. برخلاف پروفیل‌های ۱ و ۲، بعد فرکتال قطبش القایی در پروفیل ۳ به سطح توزیع براونی رسیده و در بازه ۹ تا ۱۱ میلی‌ولت، گذار دفعی از روند خطی به غیر خطی داشته است. با

1. ArcGIS
2. Linear

جدول ۳. کمیت‌های تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات قطبش القایی در پروفیل ۳، کانسار مس کوشک بهرام

Table 3. Variance-Distance function quantities in exchange for induced polarization along P3 profile in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

NO	Area (m2)	IP (mv)	IP Var.	IP Dist.	Log (Var.)	Log (Dist.)	Differential FD	Popular FD	Remarks
1	21125	2.23	244.12	69.09	2.39	1.84	39.51		
2	20825	4.64	174.51	68.51	2.24	1.84	6.08	9.66	Chaotic
3	19325	6.32	133.07	65.52	2.12	1.82	-2.76		
4	16925	7.99	97.19	73.42	1.99	1.87	1.08	1.08	Linear
5	12625	9.79	64.95	50.48	1.81	1.70	2.06	2.06	Brownian
6	8425	11.69	37.92	38.87	1.58	1.59	1.32		
7	4525	13.25	21.17	25.03	1.33	1.40	1.47	1.47	Post Linear
8	1725	15.42	5.90	10.51	0.77	1.02	1.40		
9	525	17.85	0.00	0.00	0.00	0.00	nd		



شکل ۸. A: نمودار تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات قطبش القایی در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲ کانسار مس کوشک بهرام و B: نمودار تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات قطبش القایی در امتداد پروفیل ۳ کانسار مس کوشک بهرام

Fig. 8. A: Variance - Distance diagram in exchange for induced polarization changes along the profiles 1 and 2 in the Kushk-e-Bahram Cu deposit, and B: Variance - Distance diagram in exchange for induced polarization changes along the profile 3 in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

کانه‌زایی فلزات پایه در کانسارهای اپی‌ژنتیک مطابقت دارد؛ پیدایش سطح توزیع براونی ($FD=2.79$)، ملاک معتبری برای بررسی تغییرات رسانایی در فاصله‌های ۲۴ تا ۳۰ متر از مرکز بی‌هنجاری محسوب می‌شود.

طبق مطالب جدول ۴، مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲، از سطح توزیع براونی برخوردار است. این سطح در بازه ۴۳۹ تا ۵۴۰ اهم متر مشاهده شده و گویای افزایش هدایت الکتریکی (یا الکترولیتی) در جامعه آستانه است. با توجه به اینکه حدود آستانه‌ای مقاومت ویژه الکتریکی با شرایط

جدول ۴. کمیت‌های تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات مقاومت ویژه در پروفیل‌های ۱ و ۲، کانسار مس کوشک بهرام

Table 4. Variance-Distance function quantities in exchange for electrical resistivity changes along P1 and P2 profiles in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

NO	Area (m ²)	RS (ohm.m)	RS Var.	RS Dist.	Log (Var)	Log (Dist.)	Differential FD	Popular FD	Remarks
1	241200	48.7387	439107.28	265.87	5.64	2.42	0.48		
2	98300	119.3400	350523.68	165.65	5.54	2.22	0.36	0.48	Pre Linear
3	24200	196.8957	264704.80	76.50	5.42	1.88	0.78		
4	7300	281.4316	184864.57	48.22	5.27	1.68	0.71		
5	4600	361.2331	122610.13	26.99	5.09	1.43	1.17	0.89	
6	2600	439.4802	73935.16	17.49	4.87	1.24	2.87	2.87	Brownian
7	1800	540.5623	29182.24	12.66	4.47	1.10	1.82		
8	1000	617.5112	8813.30	6.56	3.95	0.82	4.83	1.82	Post Linear
9	400	711.3904	0.00	0.00	0.00	0.00	nd		

پروفیل P3 شاهد چنین تحولی نیستیم. توزیع غیرخطی قطبش القایی در امتداد P3 تحت شرایط آرمانی قرار دارد و از مطابقت نسبی با سطح توزیع مقاومت ویژه الکتریکی برخوردار است. انطباق این دو کمیت برای ارزیابی شاخص رسانایی الکترونی مناطق دگرسانی اهمیت دارد.

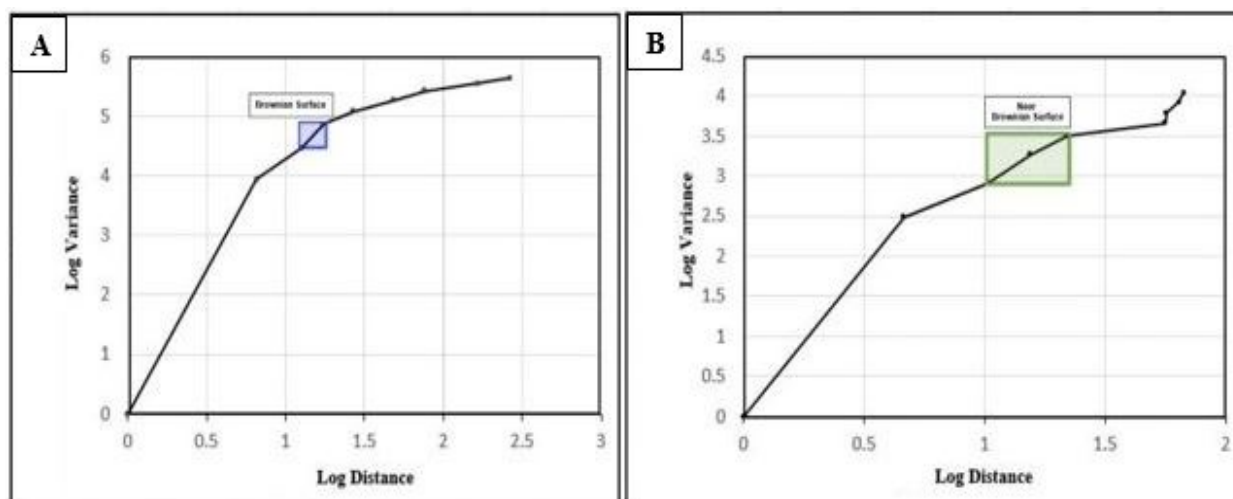
بر این اساس، الگوی توزیع سطحی داده‌های ژئوالکتریک به کمک مدل پراش - مسافت و با استفاده از تغییرات بعد فرکتالی مقاومت ویژه الکتریکی، قطبش القایی و پتانسیل خودزای الکتریکی به دست آمده است. در این شکل‌ها، الگوی همیافتی مقاومت ویژه با قطبش القایی در امتداد پروفیل‌های P1 و P2 (شکل ۹-A) و پروفیل P3 (شکل ۹-B) ارائه و کمیت‌های متناسب با سطوح توزیع براونی درج شده‌اند.

طبق جدول ۵، مقاومت الکتریکی در امتداد پروفیل ۳، از توزیع نزدیک به سطح براونی (بعد فرکتال برابر ۱/۸۵) برخوردار است. این سطح در بازه ۷۲ تا ۱۰۰ اهم متر و در فاصله ۲۴ تا ۳۶ متر از بیشینه مقاومت الکتریکی است. تغییرات رسانایی در حدود آستانه‌ای مقاومت ویژه الکتریکی برای توسعه رویداد کانه‌زایی ذخایر اپی‌ژنتیک اهمیت دارد، لذا در مقایسه با پروفیل‌های ۱ و ۲، سطح نزدیک به توزیع براونی در پروفیل ۳ کم اهمیت‌تر است؛ اما از گسترش خوبی در اطراف این پروفیل برخوردار است. از دیدگاه فرکتال، تغییرات پتانسیل خودزا در امتداد پروفیل‌های P1 و P2 قابل مقایسه با تغییرات مقاومت ویژه در آستانه P3 است. همچنین تغییرات مقاومت ویژه در امتداد پروفیل‌های P1 و P2، به سطح توزیع براونی رسیده؛ اما در

جدول ۵. کمیت‌های تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات مقاومت ویژه در پروفیل ۳، کانسار مس کوشک بهرام

Table 5. Variance-Distance function quantities in exchange for electrical resistivity changes along P3 profile in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

NO	Area (m ²)	RS (ohm.m)	RS Var.	RS Dist.	Log (Var.)	Log (Dist.)	Differential FD	Popular FD	Remarks
1	21100	24.11	10950.32	67.04	4.04	1.83	5.50		
2	19500	37.16	8389.15	63.87	3.92	1.81	2.69	3.37	Stochastic
3	16200	50.34	6148.90	56.90	3.79	1.76	21.90		
4	9900	60.90	4604.12	56.15	3.66	1.75	0.40	0.40	Pre Linear
5	4300	72.41	3175.13	22.07	3.50	1.34	1.51		
6	2900	85.68	1855.09	15.46	3.27	1.19	2.02	1.79	Near Brownian
7	2000	100.17	817.25	10.31	2.91	1.01	1.22		
8	1200	111.26	306.04	4.62	2.49	0.66	3.74	1.22	Linear
9	700	128.76	0.00	0.00	0.00	0.00	nd		



شکل ۹. A: نمودار تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات مقاومت ویژه در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲ کانسار مس کوشک بهرام و B: نمودار تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات مقاومت ویژه در امتداد پروفیل ۳ کانسار مس کوشک بهرام

Fig. 9. A: Variance - Distance diagram in exchange for electrical resistivity changes along the profiles 1 and 2 in the Kushk-e-Bahram Cu deposit, and B: Variance - Distance diagram in exchange for electrical resistivity changes along the profile 3 in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

بعد فرکتالی آستانه قابل توجه است؛ زیرا به ازای پتانسیل خودزای ۲۰۸ تا ۲۳۱ میلی‌ولت که در فاصله ۴۷ تا ۹۰ متری از مرکز بی‌هنجاری رخ داده، به سطح توزیع براونی نزدیک شده است (FD=1.7). در شکل ۹، تغییرات پتانسیل خودزای الکتریکی در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲، نشان داده شده است.

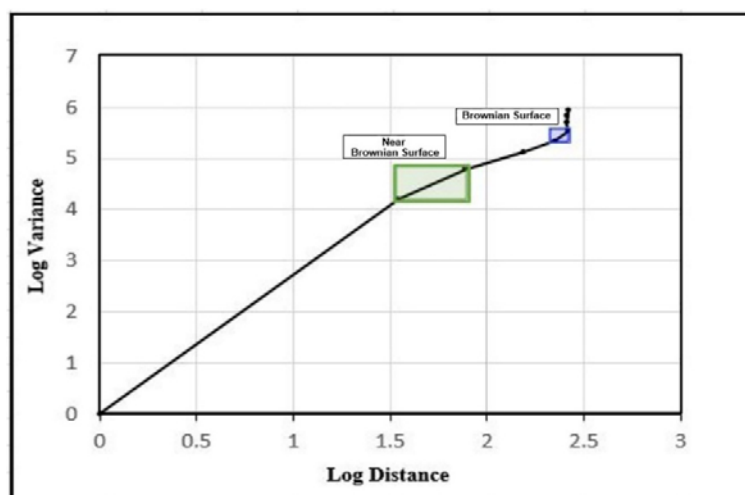
طبق جدول ۶، تغییرات پتانسیل خودزای الکتریکی، در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲ از دامنه نسبتاً وسیعی برخوردار بوده و به بعد فرکتالی متناسب با سطوح براونی و شبه براونی (نزدیک به سطح براونی) منجر شده است. ظهور سطح براونی در فاصله ۲۶۳ متری از مرکز بی‌هنجاری، امری نامتعارف و غیر قابل استناد است (به دلیل نزدیک بودن آن به حدود زمینه‌ای آشوبناک). اما تغییرات

جدول ۶. کمیت‌های تابع پراش - مسافت به ازای تغییرات پتانسیل خودزا، پروفیل‌های ۱ و ۲، کانسار مس کوشک بهرام**Table 6.** Variance-Distance function quantities in exchange for electrical self-potential changes along P1 and P2 profiles in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

NO	Area (m ²)	SP (mv)	SP Var.	SP Dist.	Log (Var.)	Log (Dist.)	Differential FD	Popular FD	Remarks
1	238800	-482.98	883885.22	263.15	5.95	2.42	40.29		
2	235900	-369.21	682913.33	261.47	5.83	2.42	33.47	36.07	Chaotic
3	231800	-251.39	502058.97	259.08	5.70	2.41	-20.59		
4	218800	-127.32	341638.26	263.97	5.53	2.42	2.72	2.72	Brownian
5	176000	-10.87	219067.71	224.13	5.34	2.35	1.38		
6	88600	93.58	132201.40	155.36	5.12	2.19	1.10	1.18	Linear
7	25700	208.64	61771.04	77.85	4.79	1.89	1.71		
8	7100	331.89	15695.98	34.93	4.20	1.54	2.72	1.71	Near Brownian
9	500	457.18	0.00	0.00	0.00	0.00	nd		

صورت گرفته و ملاک ارزیابی بی‌هنجاری‌های ژئوالکتریک، مبتنی بر خودسامان‌دهی طبیعی میدان‌ها در اطراف ذخایر هیپوژنیک است. چنان‌که در مقدمه پژوهش بیان شد، کانسار کوشک بهرام یک ذخیره ماگمایی با ویژگی‌های نوع مانتو است که سازوکار پیدایش آن از اصل توزیع مؤلفه‌های متناظر پیروی می‌کند (منشأ هیپوژن دارد). بنابراین انتظار می‌رود که توزیع کمیت‌های ژئوالکتریک، به صورت مستقل از مقیاس و مبتنی بر روابط فرکتال باشد (حل مشتق و تحلیل معادلات دیفرانسیل کاربرد ندارند).

همچنین در هر دو شکل، از تغییرات بعد فرکتالی و شعاع اثر سطح توزیع براونی^۱ ثبت شده در جدول‌های ۲ تا ۶، برای مشخص کردن توزیع فرکتالی کمیت‌های ژئوالکتریک استفاده شده است. رنگ آبی نشان‌دهنده سطح توزیع براونی، رنگ سبز نشان‌دهنده توزیع نزدیک به سطح براونی و رنگ خاکستری بیانگر ناحیه اثر توزیع خطی است. تشخیص و رسم سطوح توزیع براونی و شبه براونی، بر اساس تغییرات بعد فرکتال (جدول‌های ۵ و ۶) و با استناد بر تابع چگالی پراش - مسافت، تغییرات پتانسیل خودزا در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲ مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰

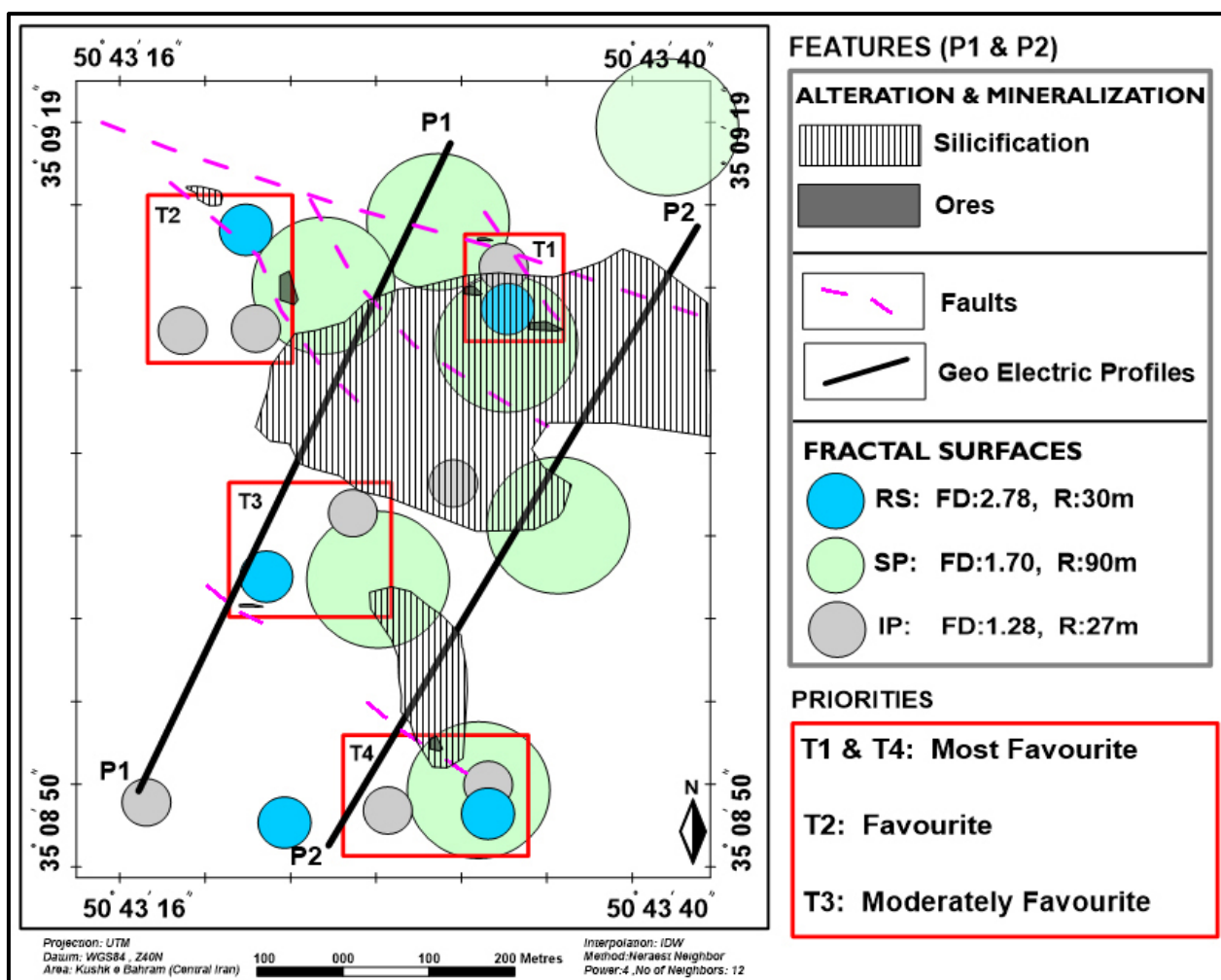


شکل ۱۰. تغییرات پتانسیل خودزا در امتداد پروفیل‌های ۱ و ۲، کانسار مس کوشک بهرام

Fig. 10. Electrical self- potential changes along P1 and P2 profiles in the Kushk-e-Bahram Cu deposit

است. بر همین اساس، الگوهای ارائه شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، بیانگر سیمای فرکتالی تغییرات سطحی پروفیل‌های ژئوالکتریک در کوشک بهرام هستند که بر خلاف روش‌های آماری متداول (کلاسیک- اقلیدسی)، مکان هندسی بی‌هنجاری‌های IP، RS و SP را بر اساس اصل توزیع کمیت‌های متناظر^۲ نشان داده‌اند و بیانگر هدایت الکتریکی متناسب با رویداد کانه‌زایی هستند.

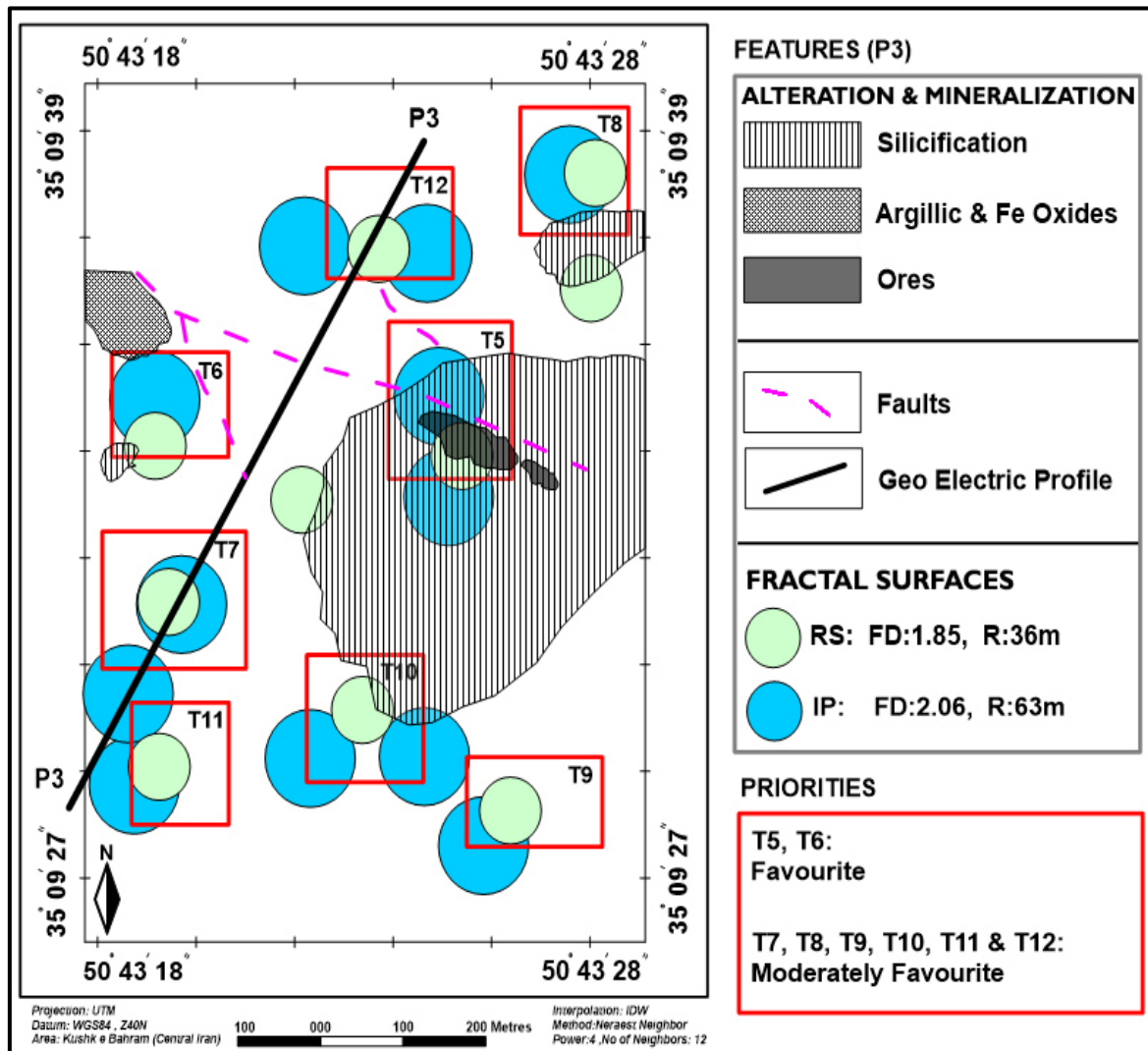
با توجه به تغییرات بعد فرکتال، چهار اولویت اکتشافی^۱ در اطراف پروفیل‌های P1 و P2 (شکل ۱۱) و هشت اولویت دیگر در اطراف پروفیل P3 (شکل ۱۲) شناسایی شده‌اند. تعیین اولویت‌های شکل ۱۱، بر اساس تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی، بارپذیری الکتریکی و پتانسیل خودزای الکتریکی بوده است؛ در حالی که برای معرفی اولویت‌های شکل ۱۲، از دو کمیت مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری الکتریکی استفاده شده



شکل ۱۱. اولویت‌های اکتشافی کانسار مس کوشک بهرام در پروفیل‌های P1 و P2، بر اساس سطح توزیع براونی داده‌های ژئوالکتریک (مقاومت ویژه دارای توزیع براونی، پتانسیل خودزای دارای توزیع نزدیک به سطح براونی و قطبش القایی دارای توزیع خطی است).

Fig. 11. Exploratory priorities along P1 and P2 profiles in the Kushk-e-Bahram Cu deposit, Based on the Brownian distribution surface of geoelectric data (Resistivity has a Brownian distribution, self-potential has a near distribution to Brownian surface and inductive polarization has a linear distribution).

1. Target Area
2. Self-Similar Distribution



شکل ۱۲. اولویت‌های اکتشافی کانسار مس کوشک بهرام در پروفیل P3، بر اساس سطح توزیع براونی داده‌های ژئوالکتریک (قطبش القایی دارای توزیع براونی و مقاومت ویژه الکتریکی از توزیع نزدیک به سطح براونی برخوردار است).

Fig. 12. Exploratory priorities in P3 profile in the Kushk-e-Bahram Cu deposit, based on the Brownian distribution surface of geoelectric data (Inductive polarization has a Brownian distribution and Resistivity has a near distribution to Brownian surface).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده، الگوی توزیع داده‌های ژئوالکتریک به کمک مدل پراش-مسافت و با استفاده از تغییرات بعد فرکتالی مقاومت ویژه الکتریکی، قطبش القایی و پتانسیل خودزای الکتریکی به دست آمده است. بر این اساس، در شکل ۵، مقاومت ویژه الکتریکی به سطح توزیع براونی رسیده است؛ اما پتانسیل خودزا در شرایط نزدیک به سطح توزیع

براونی قرار دارد. همچنین توزیع قطبش القایی بدون اجزای متناظر بوده و نقش زیادی در تعیین اولویت‌های اکتشافی این منطقه ندارد (احتمال کانه‌زایی پراکنده در اطراف پروفیل‌های P1 و P2 ضعیف است).

به این صورت، اهداف T1 و T4 از بیشترین هم‌پوشانی کمیت‌های ژئوالکتریک برخوردارند و به عنوان مهم‌ترین مناطق امیدبخش لحاظ شده‌اند. زمینه فراگیر پتانسیل خودزای الکتریکی

فرکتالی مقاومت ویژه الکتریکی، احتمال کانه‌زایی با بافت متراکم بیشتر از انواع پراکنده است).

با توجه به تفاوت رفتار فرکتالی کمیت‌های مقاومت ویژه الکتریکی، قطبش القایی و پتانسیل خودزای الکتریکی در مناطق امیدبخش کانسار کوشک بهرام، ضروری است تا تفسیر مقاطع ژئوالکتریک بر مبنای تغییرات بعد فرکتال صورت گیرد و در حد امکان از خطای اریبی ناشی از برازش کمیت‌های نامتناظر جلوگیری شود. بر این اساس، تغییرات سطح توزیع مقاومت ویژه و قطبش القای الکتریکی در امتداد پروفیل‌های P1 و P2 از روند متناظری برخوردار نیست. لذا در شکل ۶، محاسبه و تحلیل همبستگی مقاومت ویژه الکتریکی با قطبش القایی موضوعیت فرکتالی ندارد.

با در نظر گرفتن نتایج مدل پراش - مسافت که با هدف بررسی ارتباط داده‌های ژئوالکتریک با پتانسیل کانه‌زایی در عمق کانسار کوشک بهرام انجام شد (شکل‌های ۸ و ۹)، ادامه فعالیت‌های اکتشافی (فاز تفصیلی) در امتداد پروفیل‌های P1، P2 و P3 به تفکیک دو نوع کانه‌زایی پراکنده^۱ و متراکم رگه‌ای^۲ پیشنهاد می‌شود. در این رابطه و با نتیجه‌گیری از سازوکار توزیع براونی کمیت‌های مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی، اولویت پروفیل‌های P1 و P2 با کانه‌زایی رگه‌ای و در پروفیل P3 با کانه‌زایی پراکنده است.

قدردانی

این پژوهش، با همکاری شرکت محترم معدنی حدیدگستر سیرجان انجام شده است. نویسندگان از جناب آقای حسینی، مدیر محترم شرکت و آقایان دکتر مهدی تهامی و دکتر احسان حاج مولاعلی کمال تشکر را دارند.

و جدایش سطح براونی مقاومت ویژه الکتریکی از روند خطی قطبش القایی، دو ویژگی مهم در اهداف یادشده هستند که احتمال کانه‌زایی فلزات پایه را بر اساس یافته‌های ژئوفیزیکی افزایش می‌دهند.

هدف T2 از اولویت کمتری نسبت به T1 و T4 برخوردار است؛ زیرا هم‌پوشانی سطوح مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزای الکتریکی ضعیف بوده و ارتباط معناداری بین سطح براونی مقاومت ویژه الکتریکی و توزیع خطی قطبش القایی مشاهده نمی‌شود. همچنین هدف T3 از کمترین اولویت اکتشافی در محدوده پروفیل‌های P1 و P2 برخوردار است (پوشش فراگیر پتانسیل خودزای الکتریکی مشاهده نمی‌شود و ارتباط مکانی مقاومت ویژه الکتریکی با قطبش القایی و پتانسیل خودزای الکتریکی برقرار نیست).

در شکل ۸، قطبش القایی به سطح توزیع براونی رسیده است؛ اما مقاومت ویژه الکتریکی در نزدیکی سطح براونی قرار دارد. بنابراین علیرغم نبود کمیت پتانسیل خودزای الکتریکی، تعیین اولویت‌های اکتشافی پروفیل P3 امکان‌پذیر شده است.

با مقایسه اهداف اکتشافی T5 تا T12، می‌توان به اهمیت چهارگوشه‌های T5 و T6 اشاره کرد که دارای هم‌پوشانی مؤثر و در عین حال تفریقی مقاومت ویژه الکتریکی با قطبش القایی هستند. در سایر اولویت‌های اکتشافی شکل ۹، سازوکار هندسی نسبتاً مشابهی برقرار است که در آن علیرغم تفریق جزئی مقاومت ویژه از سطح توزیع قطبش القایی، دوقطبی شاخصی بین مؤلفه‌های ژئوالکتریک مشاهده نمی‌شود (حدود زمینه‌ای غالب است). نکته قابل توجه آن، توسعه بیشتر سطح قطبش القایی از سطح مقاومت ویژه الکتریکی است که نشان‌دهنده بلوغ فرکتالی قطبش القایی در اطراف پروفیل P3 بوده و احتمال کانه‌زایی پراکنده را افزایش می‌دهد (بر خلاف شکل ۸ که به دلیل بلوغ

References

- Afzal, P., Adib, A. and Ebadati, N., 2018. Delineation of seismic zonation using fractal modeling in West Yazd province, Central Iran. *Journal of Seismology*, 22(6):1377–1393. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9770-9>
- Afzal, P., Yusefi, M., Mirzaie, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S. and Daneshvar Saein, L., 2019. Delineation of podiform-type chromite mineralization using geochemical mineralization prospectivity index and staged factor analysis in Balvard area (SE Iran). *Journal of Mining and Environment*, 10(3): 705–715. <https://dx.doi.org/10.22044/jme.2019.8107.1678>
- Amidi, M.A., Shahrabi, M. and Navaei, Y., 2006. Geological Map of Zavieh, Scale 1: 100,000, Geological Survey of Iran.
- Bayram, I. and Selesnick, I.W., 2009. Frequency-Domain Design of Overcomplete Rational-Dilation Wavelet Transforms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57(8): 2957–2972. <https://doi.org/10.1109/TSP.2009.2020756>
- Boomeri, M., Nakashima, K. and Lentz, D.R., 2010. The Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: a mineralogical analysis of the igneous rocks and alteration zones including halogen element systematics related to cu mineralization processes. *Ore Geology Reviews*, 38(4): 367–381. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.09.001>
- Jebeli, M., Afzal, P., Pourkermani, M. and Jafarirad, A., 2018a. Correlation between rock types and Copper mineralization using fractal modeling in Kushk-e-Bahram deposit, Central Iran. *Geopersia*, 8(1): 131–141. <https://dx.doi.org/10.22059/geope.2017.237332.648334>
- Jebeli, M., Kheyrollahi, H. and Afzal, P., 2018b. Exploration and Interpretation Geophysical using of IP and RS Data in Kushk-e-Bahram Manto Copper deposit, NE Saveh. The 21 Symposium of Geological Society of Iran, Geological society of Iran, Ghom, Iran.
- Mandelbrot, B.B., 1983. The fractal geometry of nature. Wh Freeman, San Fransisco, 460 pp. <https://doi.org/10.1002/esp.3290080415>
- Mandelbrot, B., 2002. Gaussian self-affinity and fractals: globality, the earth, 1/f noise, and R/S., Springer Science & Business Media, New York, 637 pp.
- Mark, D. and Aronson, P., 1984. Scale-dependent fractal dimension of topographic surfaces: An empirical investigation, with application in geomorphology and computer mapping. *Mathematical Geology*, 16(7): 671–683. <https://doi.org/10.1007/BF01033029>
- Mehrnia, S.R., 2013. Application of fractal geometry for recognizing the pattern of textural zoning in epithermal deposits: (case study: Shikhdarabad Au-Cu indices EastAzerbaijan province). *Journal of Economic Geology*, 5(1): 23–36. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v5i1.22885>
- Mehrnia, S.R., 2016. 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://dx.doi.org/10.22067/econg.v8i2.42454>
- Mehrnia, S.R. and Jelvegar Filband, A., 2019. Geostatistics Applications for Modeling Description of Reservoirs. Setayesh Press, Tehran, 286 pp.
- Shahabpour, J. and Kramers, J.D., 1987. Lead isotope data from the sarcheshmeh porphyry copper deposit, iran. *Mineralium Deposita*, 22(4): 278–281. <https://doi.org/10.1007/BF00204520>
- Teymorian Motlagh, A., Ebrahimzadeh Ardestani, V., Mehrnia, S.R., 2012. Fractal method for determining the density of the stone tablet in Charak region (southern Iran). *Life Science Journal*, 9(4): 1913–1923. Retrieved April 01, 2021 from <http://www.lifesciencesite.com>
- Thorarinsson, F and Magnusson, G., 1990. Bouguer density determination by fractal analysis. *Geophysics*, 55(7): 932–935. <https://doi.org/10.1190/1.1442909>
- Turcotte, D., 1997. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge 398 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174695>
- Whitney, D.L and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95(1):185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>

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**

Jebeli, M., Mehrnia, S.R. and Afzal, P., 2021. Application of fractal modeling for processing and analysis of geoelectrical components in the Kushk-e-Bahram copper deposit (Central Iran). *Journal of Economic Geology*, 13(3): 645–664. (in Persian with English abstract)
<https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i3.88147>



Application of fractal modeling for processing and analysis of geoelectrical components in the Kushk-e-Bahram copper deposit (Central Iran)

Marjan Jebeli^{1*}, Seyed Reza Mehrnia² and Peyman Afzal³

1) Young Researchers and Elite Club, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2) Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

3) Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Submitted: Aug. 09, 2020

Accepted: June 01, 2021

Keywords: *Variance-Distance (V-D) fractal model, Fractal Dimension, Kushk-e-Bahram copper deposit*

Introduction

The Kushk-e-Bahram Manto type copper deposit is located in the central Iran zone and is Uremia-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA) belt which includes copper porphyry deposits and related mineralization types, including the Manto type copper deposits (Jebeli et al., 2018a, b). Based on the type of mineralization and the presence of sulfides, high electrical conductivity (low electrical resistivity) can be detected in this deposit such as the Manto type deposits (Mehrnia, 2013., Mehrnia, 2016., Teymoorian Motlagh et al., 2012). On the other hand, Induced Polarization (IP) and electrical resistivity (RS) were used in the Kushk-e-Bahram deposit.

Material and Methods

The relationship between geoelectrical parameters and the mineralization process were recognized in geophysical assessments of the Kushk-e-Bahram deposit. It is necessary to obtain information about the shape and distribution of the orebody. According to exploratory data of the Kushk-e-Bahram deposit (Jebeli et al., 2018a, b), Cu mineralization has been extended. Therefore, the location and number of geoelectrical profiles were selected, based on previous studies which was generated in the ArcGIS software. The exchanges in the RS and IP values were measured, along three profiles (P1, P2, P3) and Dipole-Dipole arrangement with electrode distance of 10 meters. The device type used is WJD-3 and 1620 harvest points were surveyed. IP-RS profiles with azimuth

30 to 40 degrees were used in order to identify mineralization areas based on the highest variability of conductivity and load-bearing properties. Moreover, they were designed and surveyed perpendicular to the mineralization process of the area. Considerations were taken into account based on the location of trenches and the mineralization sequence of this area. The P1 and P2 profiles with an approximate length of one kilometer and P3 profile with an approximate length of 370 m were designed and harvested under a 30 degree azimuth.

Results and Discussion

In this research study, a number of geoelectrical sections were selected and their surface changes in a two-dimensional environment were refined and internalized by the algorithm used in the diffraction-distance distribution function. According to the position of P1 and P2 profiles, all three quantities of RS, IP and self-Potential have been interpolated to match the alteration zones and faults of the study area in the P3. The quantity of Spontaneous Potential (SP) is not measured and it just suffices to internalize specific electrical changes and IP and their conformity with the effects of alteration and faults in the region. Interpolation of geo-electrical data by the inverse distance weighting estimation method and nearest neighborhood algorithms were carried out (Mehrnia, 2016; Teymoorian Motlagh et al., 2012). Based on the fractal dimension, four targets around the P1 and P2 profiles and eight priorities have

*Corresponding author Email: jebeli_marjan@yahoo.com

been identified around the P3 profile. Based on the results, geo-electrical data distribution pattern was obtained using diffraction-distance model and changes in the fractal dimension of electrical resistivity, induced polarization and self-generating electric potential according to the differences of the fractal dimensions for IP, RS and SP in the Kushk-e-Bahram deposit. It is necessary to interpret geo-electrical sections based on fractal dimension exchanges to avoid the oblique error caused by the fitting of disproportionate quantities as much as possible. Consequently, exchanges in the level of electrical resistivity and induced polarization were calculated. There is no corresponding trend along P1 and P2 profiles. Thus, the results of the diffraction-distance model were correlated with mineralization potential in the depth of the deposit. Continuation of exploration activities (detailed phase) along the P1, P2 and P3 profiles are suggested. Based on inferring from the Brownian mechanism distribution of electrical resistivity quantities and inductive polarization, priority of P1 and P2 profiles with vein and disseminated mineralization in P3 profile is obtained.

References

- Jebeli, M., Afzal, P., Pourkermani, M. and Jafarirad, A., 2018a. Correlation between rock types and Copper mineralization using fractal modeling in Kushk-e-Bahram deposit, Central Iran. *Geopersia*, 8(1): 131–141. <https://dx.doi.org/10.22059/geope.2017.237332.648334>
- Jebeli, M., Kheyrollahi, H. and Afzal, P., 2018b. Exploration and Interpretation Geophysical using of IP and RS Data in Kushk-e-Bahram Manto Copper deposit, NE Saveh. The 21 Symposium of Geological Society of Iran, Geological society of Iran, Ghom. Iran.
- Mehrnia, S.R., 2013. Application of fractal geometry for recognizing the pattern of textural zoning in epithermal deposits: (case study: Shikhdarabad Au-Cu indices EastAzerbaijan province). *Journal of Economic Geology*, 5(1): 23–36. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v5i1.22885>
- Mehrnia, S.R., 2016. 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://dx.doi.org/10.22067/econg.v8i2.42454>
- Teymorian Motlagh, A., Ebrahimzadeh Ardestani, V., Mehrnia, S.R., 2012. Fractal method for determining the density of the stone tablet in Charak region (southern Iran). *Life Science Journal*, 9(4): 1913–1923. Retrieved April 01, 2021 from <http://www.lifesciencesite.com>