



## کاربرد روش فرکتال در تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی - ژئوشیمیایی کانسار سرب و روی تکیه (جنوب شرقی اراک)

سید رضا مهرنیا\*

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران

دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۱۳

### چکیده

کانسار تکیه در جنوب شرقی اراک متعلق به زون ساختاری سنندج- سیرجان در پهنه فلززایی ملایر- اصفهان است که در امتداد گسل‌های وارونه و چین‌خوردگی‌های منسوب به تاقدیس ویشان- تکیه از توان کانه‌زایی خوبی برخوردار است. پیدایش سرب و روی این منطقه مرهون فعالیت پساآتشفشانی آلپ است که در نزدیکی سازندهای کربناتی کرتاسه، به دو شکل هم‌زاد و دیرزاد تشکیل شده است. در این پژوهش، از دو روش آمار کلاسیک و فرکتال، به ترتیب برای دست‌یابی به الگوی توزیع خطی و غیرخطی عناصر هدف استفاده شده است تا ارزیابی دقیقی از وضعیت بی‌هنجاریهای منطقه به دست آید. در روش کلاسیک، از شاخصهای مرکزی و پراکندگی برای تعیین همبستگی داده‌ها استفاده شده است؛ اما در روش فرکتال، معیار توزیع بی‌هنجاریها بر اساس تغییر بعد اجزای متناظر بوده و با افزایش همبستگی داده‌ها همراه است. هر دو روش، امکان ارزیابی رابطه مکانی سرب و روی را با تغییرات ژئوالکتریک کانسار تکیه فراهم کرده‌اند؛ ولی روش فرکتال با استناد بر ویژگیهای خودتشابهی کمیتها، به شاخص همبستگی معتبری دست یافته است که با شواهد کانی‌شناختی این منطقه مطابقت دارد. بدین ترتیب احتمال غنی‌شدگی سرب در واحدهای دگرسانی غرب تکیه، بیشتر از شرق آن است؛ اما وضعیت ژئوشیمیایی روی در واحدهای دگرسانی شرقی تکیه امیدوار کننده‌تر از غرب آن است.

واژه‌های کلیدی: توزیع غیر خطی، روشهای آماری، فرکتال، کانسار تکیه

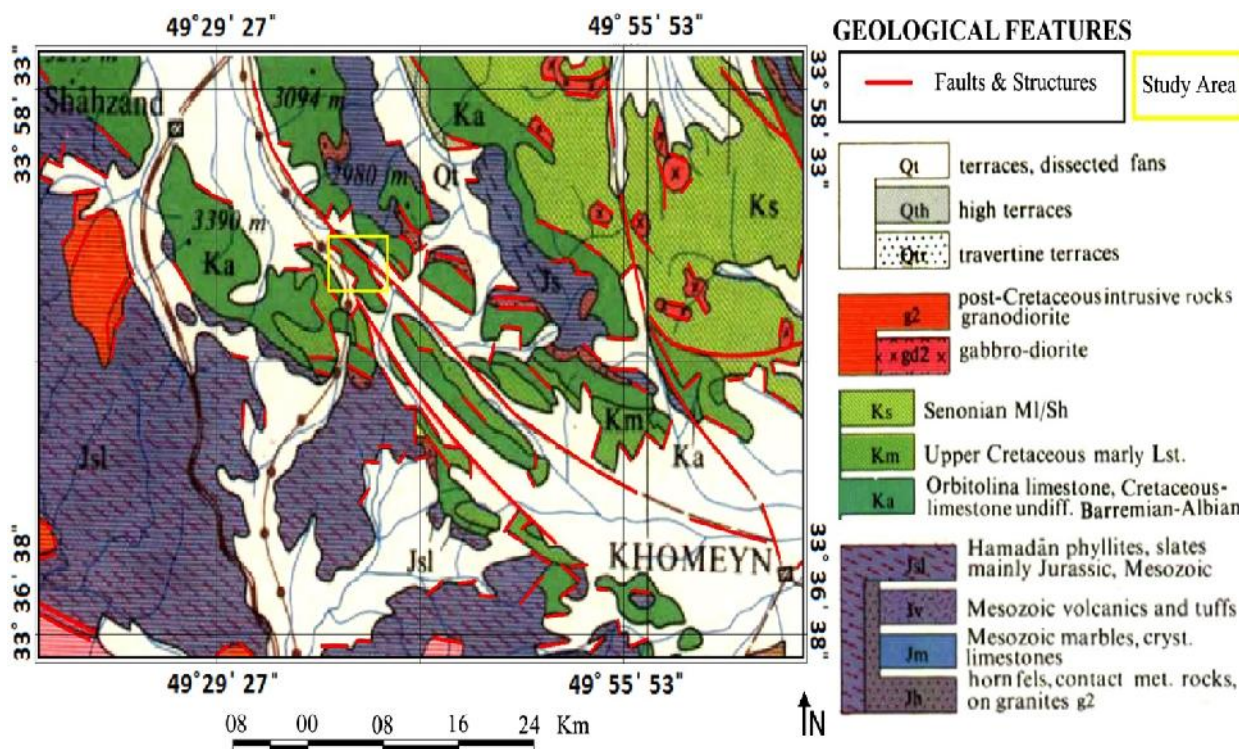
### مقدمه

چینه‌های برگشته و سامانه‌های گسلی معکوس، از تظاهرات ساختمانی معمول در این ایالت فلززایی هستند. آثار کانه‌زایی (با منشأ اگزالاتیو) در فاصله دور از توده‌های نفوذی دیده می‌شود (Momenzadeh, 1976). شکل ۱، سازندهای زمین‌شناسی ناحیه مورد بررسی را بر اساس مندرجات نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شازند- خمین نشان می‌دهد (Annells et al., 1985). چنان‌که مشاهده می‌شود، ذخیره اصلی کانسار تکیه در سنگهای آهکی- اربیتولین‌دار متعلق به اوایل کرتاسه است. بر اساس پژوهشهای انجام شده (Momenzadeh and Ziseman, 1981)، اغلب تواناییهای فلزی این ناحیه به صورت هم‌زاد و در پی فعالیتهای آتشفشانی زیردریایی به وجود آمده‌اند. بنابراین، کانه‌زایی رگه‌ای، ناشی از بازاحیایی فلزات و

کانسار سرب و روی تکیه (جنوب غربی شهرستان اراک)، به‌عنوان بخشی از ایالت فلززایی ملایر- اصفهان و متعلق به ناحیه ساختاری سنندج- سیرجان است که در هنگام فازهای کوه‌زایی سیمین- آلپین، تحت تأثیر سامانه فشارشی با روند شمال غربی- جنوب شرقی قرار گرفته و در زمان فعالیتهای آتشفشانی آن دوره، از توانایی کانه‌زایی سرب و روی برخوردار شده است (Aghanabati, 2010). این منطقه بخشی از یال جنوبی تاقدیس ویشان- تکیه با روند شمال غربی- جنوب شرقی است که به‌طور مشخص از سازندهای کربناتی کرتاسه (آهک متورق، اربیتولین‌دار و آهک دولومیتی) با میان‌لايه‌هایی از شیل و مارن تشکیل شده است (Aghanabati, 2010).

رسوبی کرتاسه و آبرفت‌های رودخانه‌ای دوره حاضر است (Annells et al., 1985).

جانشینی دوباره آنها در آهک‌های اربیتولین منطقه است. همچنین توالی چینه‌شناختی این منطقه شامل رخساره‌های



شکل ۱. واحدهای زمین‌شناسی و موقعیت کانسار تکیه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی خمین - شازند) (Annells et al., 1985)

**Fig. 1.** Geological units and location of Tekieh ore deposit (according to the geological map of Khomein-Shazand) (Annells et al., 1985)

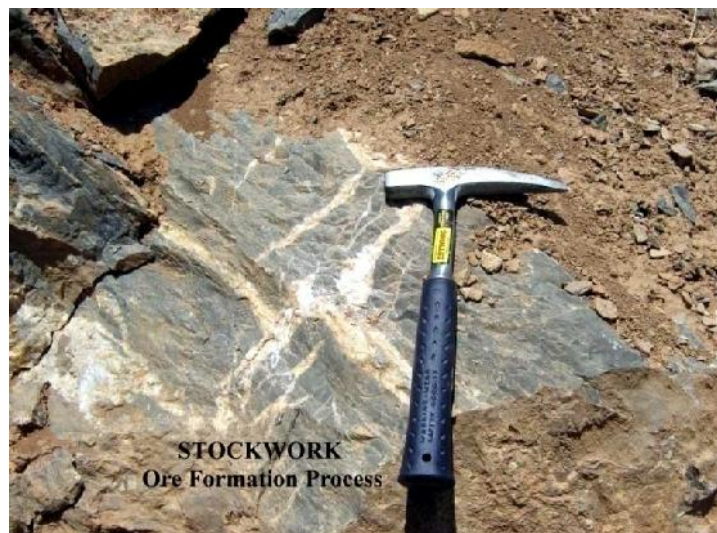
بخش زیرین آهک کرتاسه دیده می‌شود (Torkashvand et al., 2009).

شکل ۳، نمونه‌ای از رخنمون‌های کانهدار متعلق به نواحی دگرسانی غرب تکیه را نشان داده است. سنگ اولیه کربناتی بدون آثار کانه‌زایی با زمینه تیره‌رنگ است. تغییرات کانیایی این سنگ شامل افزایش ترکیبات سیلیس و اکسیدهای آهن است که همراه با افزایش سختی و چگالی واحد کانهدار، تفاوت‌های فیزیکی‌شیمیایی بارزی را نسبت به سنگ منشأ اولیه (آهک اربیتولین دار) نشان می‌دهد. کانسنگ تکیه هم‌یافتی کانیایی ساده‌ای دارد که از کانه‌های اسمیت زونیت، سروزیت، اسفالریت، گالن، پیریت، اکسیدها و کربنات‌های آهن تشکیل شده است. این دسته کانیایی توسط کوارتز، کلسیت و دولومیت همراهی می‌شوند (Momenzadeh, 1976). آثار سطحی ذخیره معدنی به‌دو صورت عدسیه‌های موازی با

در داخل سازندهای آهکی، سامانه‌های گسلی با الگوی توزیع متقاطع دیده می‌شود، این گسلها معمولاً از روند شمال غربی- جنوب شرقی و به‌ندرت از روند قرینه آن پیروی می‌کنند (Torkashvand et al., 2009). نیروهای برشی منطقه، فراوانی نواحی خردشده و تغییر شکل‌های کاتاکلاستیکی را سبب شده که در جریان بازاحیایی ماگماتیسم پالئوژن، زمینه‌های کانه‌زایی دیرزاد را در طول رگه‌های معدنی این کانسار فراهم کرده است (Momenzadeh and Ziseman, 1981). طبق شکل ۲، ساخت استوک ورک و بافت پرکننده آن، با فرآیند کانه‌زایی دیرزاد در ارتباط است. دگرسانی اطراف رگه‌ها شامل سیلیسی‌شدن، پیدایش دولومیت ثانویه و شکل‌گیری اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) است که همراه با ترکیبات سولفیدی فلزات پایه در

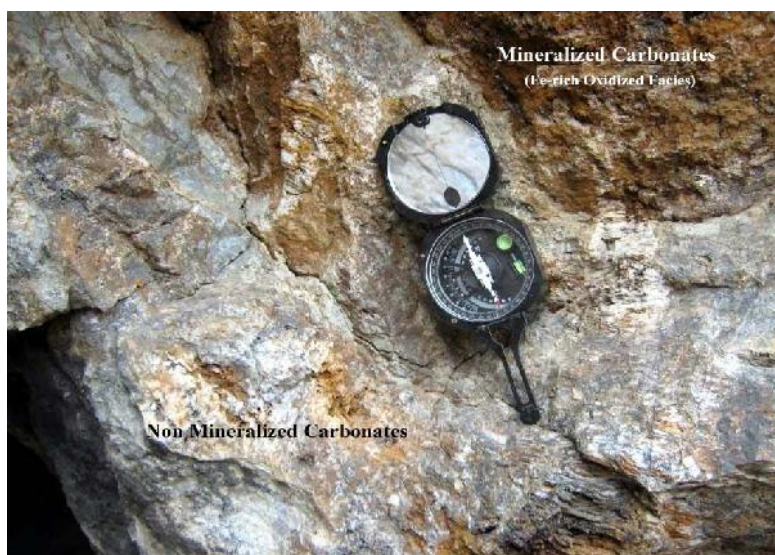
افزوده می‌شود. نمونه‌های به‌دست آمده از ترانشه‌ها بیانگر گسترش احتمالی هاله دگرسانی و افزایش عیار روی تا سقف ۴۰ درصد است (Salehi, 2004).

لایه‌بندی سنگ کربناته (هم‌زاد) و ذخایر رگه‌ای مرتبط با انشعابات گسلی (دیرزاد) یافت می‌شوند. با افزایش عمق دگرسانی، بر تعداد رگه‌ها و عیار سرب و روی (تا ۶ درصد)



شکل ۲. کانه‌زایی رگه‌ای در امتداد ساختمانهای گسلی - متقاطع (بافت استوک ورک)

**Fig. 2.** Vein type ore formation in the crossed faulted structures (Stockwork texture)



شکل ۳. در غرب کانسار تکیه، به دلیل نزدیکی سنگ کربناتی بدون کانه (خاکستری روشن) با سیالات کانه‌دار، تغییر رنگ ناشی از حضور اکسیدهای آهن (قهوه ای) دیده می‌شود.

**Fig. 3.** In the mineralized host units, the brownish colors indicate to interactions between ore-bearing solutions and non-mineralized carbonate formations (white gray) in west of Tekieh ore deposit.

شده است (Jafari, 2007). نتایج پردازش مقدماتی داده‌ها نشان‌دهنده وجود سازندهای زیرسطحی با توان هدایت الکتریکی متوسط و قطبش القایی پایدار است (Jafari,

بررسیهای ژئوفیزیکی کانسار تکیه به‌صورت پیمایشهای سطحی منظم و با هدف دست‌یابی به مؤلفه‌های مقاومت ویژه و قطبش القای الکتریکی در دو ناحیه شرقی و غربی انجام

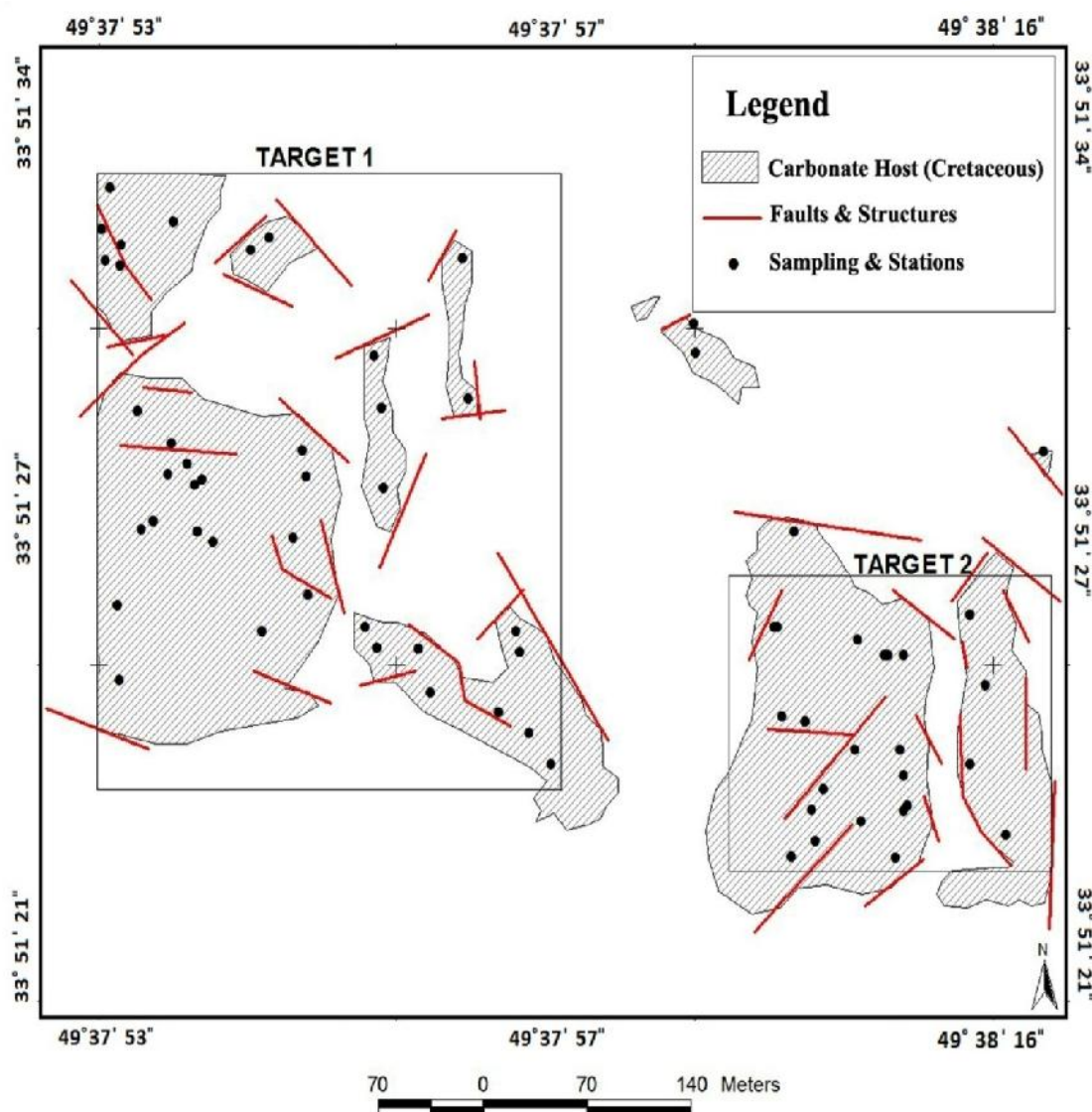
### روش مطالعه

روش موردنظر برای دست‌یابی به اولویت‌های اکتشافی ذخایر سرب و روی تکیه، بر اساس سنجش همراه با آماره‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی (نرمال‌شده) و تحلیل آنها به دو روش خطی و غیر خطی است که با تأکید بر معادلات فرکتال انجام شده است. پایگاه داده‌های ژئوفیزیکی کانسار تکیه شامل تغییرات مقاومت ویژه و پتانسیل الکتریکی به‌دست آمده از فرآیند قطبش القایی است که بر حسب ترکیب کانایی سنگ میزبان و نحوه توزیع کانه‌های اصلی (پایگاه داده‌های ژئوشیمیایی کانسار سرب و روی تکیه)، باعث پیدایش بی‌هنجاریهای ژئوالکتریک شده است. یافته‌های ژئوفیزیکی (Jafari, 2007) و ژئوشیمیایی (Salehi, 2004) این ناحیه مطابق روشهای آماری معمول و بر حسب متغیر استاندارد Z نرمالیزه شده و سازوکار توزیع آنها با تابع توزیع نرمال استاندارد مقایسه شده است. بخشی از کانه‌زایی منطقه دارای ساخت و بافت متراکم است، بنابراین با افزایش محتوای ترکیبات سولفیدی (در عمق مناطق دگرسانی)، درجه رسانایی سازندها افزایش یافته است و در پی آن، کمیت مقاومت ویژه الکتریکی کاهش پیدا می‌کند (Calagari, 2010). از دیدگاه نظری، رابطه مکانی توزیع هاله‌های سرب و روی به‌گونه‌ای است که با افزایش عمق کانسار، از محتوای کانیهای سرب کاسته و بر مقدار روی افزوده می‌شود (Hedenquist et al., 2009). همچنین با افزایش عمق دگرسانی، توزیع ترکیبات سولفیدی - کانه‌دار منسوب به سازند زیرین کرتاسه بیشتر شده است و قطبش القایی حاصل از امواج الکتریکی به‌دلیل توزیع نامتجانس بخشهای کانه‌دار افزایش می‌یابد (Calagari, 2010). از این‌رو، سازوکار افزایش نسبی مؤلفه القایی همراه با کاهش مقاومت ویژه الکتریکی، از موارد آشکار معیارهای ژئوفیزیکی در شناسایی رخساره‌های کربناتی - کانه‌دار تکیه است (Jafari, 2007). دست‌یابی به بی‌هنجاریهای ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی این منطقه مرهون نمونه‌برداری غیرسیستماتیک آن در خلال پیمایشهای سطحی بوده و با تأکید بر کنترل رخنمونهای دگرسانی انجام شده است (Jafari, 2007). طبق شکل ۴، توزیع واحدهای ساختمانی همراه با قطب‌بندی هاله‌های دگرسانی، موجب شناسایی و تفکیک دو ناحیه اکتشافی در ضلع غربی (ناحیه ۱) و شرقی (ناحیه ۲) آن شده است.

2007). در سطح پیمایش ژئوالکتریک، مکان هندسی واحدهای کانه‌دار دارای مطابقت نسبی با تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی است که به‌دلیل ضعف رسانایی لایه هوازده، از توانایی تفسیر کیفی و کمی نتایج ژئوالکتریک کاسته است (Jafari, 2007). از دیدگاه نظری، تغییر ماهیت کانه‌زایی (جایگزینی ترکیبات اکسیدی توسط کانه‌های سولفیدی) از عوامل مؤثر بر افزایش هدایت الکتریکی در عمق ذخایر فلزی است که صرف نظر از نوع ماده معدنی، پیدایش بی‌هنجاریهای محلی در مقاطع ژئوالکتریک را موجب می‌شود (Calagari, 2010). بررسی درستی و نادرستی یافته‌های ژئوفیزیکی، به تطابق شواهد زمین‌شناختی با نتایج به‌دست آمده از نقشه ژئوالکتریک و هاله‌های ژئوشیمیایی منطقه مربوط بوده که لازمه ادامه فعالیت‌های اکتشافی در فاز تفصیلی است (Calagari, 2010). سؤال اصلی پژوهش، شامل ارزیابی رابطه کمیتهای ژئوفیزیکی با نتایج اکتشافات ژئوشیمیایی و شواهد زمین‌شناسی کانسار تکیه است. بررسیهای آماری اولیه، بیانگر مستقل بودن سطح تغییرات ژئوالکتریک از کمیتهای ژئوشیمیایی است (Jafari, 2007). گسترش ناحیه هوازده از عوامل مؤثر بر کاهش ضریب همبستگی داده‌ها و افزایش ابهامات ژئوفیزیکی است که علی‌رغم تصحیحات انجام شده (Jafari, 2007)، نیازمند بازنگری آگاهانه در معیارهای متناسب با کانه‌زایی درون‌زاد است. در ضمن، توزیع سطحی متغیرهای ژئوشیمیایی، از روند غنی‌شدگی متفاوتی برخوردار است که به موجب آن، شرایط کانه‌زایی سرب و روی در دو ناحیه غربی و شرقی از هم متفاوت هستند. در چنین وضعیتی، تلفیق نتایج ژئوفیزیک با یافته‌های ژئوشیمیایی با هدف دست‌یابی به سازوکار توزیع عناصر کانساری ضرورت دارد (Karimpour et al., 2008)؛ اما به‌دلیل نبود ضرایب همبستگی معتبر (معنی‌دار)، محاسبه آماره‌های فرکتالی برای تحلیل فرآیند توزیع غیرخطی داده‌ها اجتناب‌ناپذیر خواهد بود (Mehrnia, 2013). در این روش، محاسبه ضرایب همبستگی پس از تعیین جوامع متناظر (هم‌استقامت) و در پی حذف اثرات زمینه‌ای امکان‌پذیر می‌شود. دسته‌بندی اجزای متناظر یک جامعه، به افزایش ضریب همبستگی آن با سایر کمیتهای متناظر منجر خواهد شد (Mehrnia, 2013) که از این ویژگی برای بررسی تغییرات عیار سرب و روی تکیه، بر حسب تغییر مؤلفه‌های ژئوالکتریک، استفاده شده است.

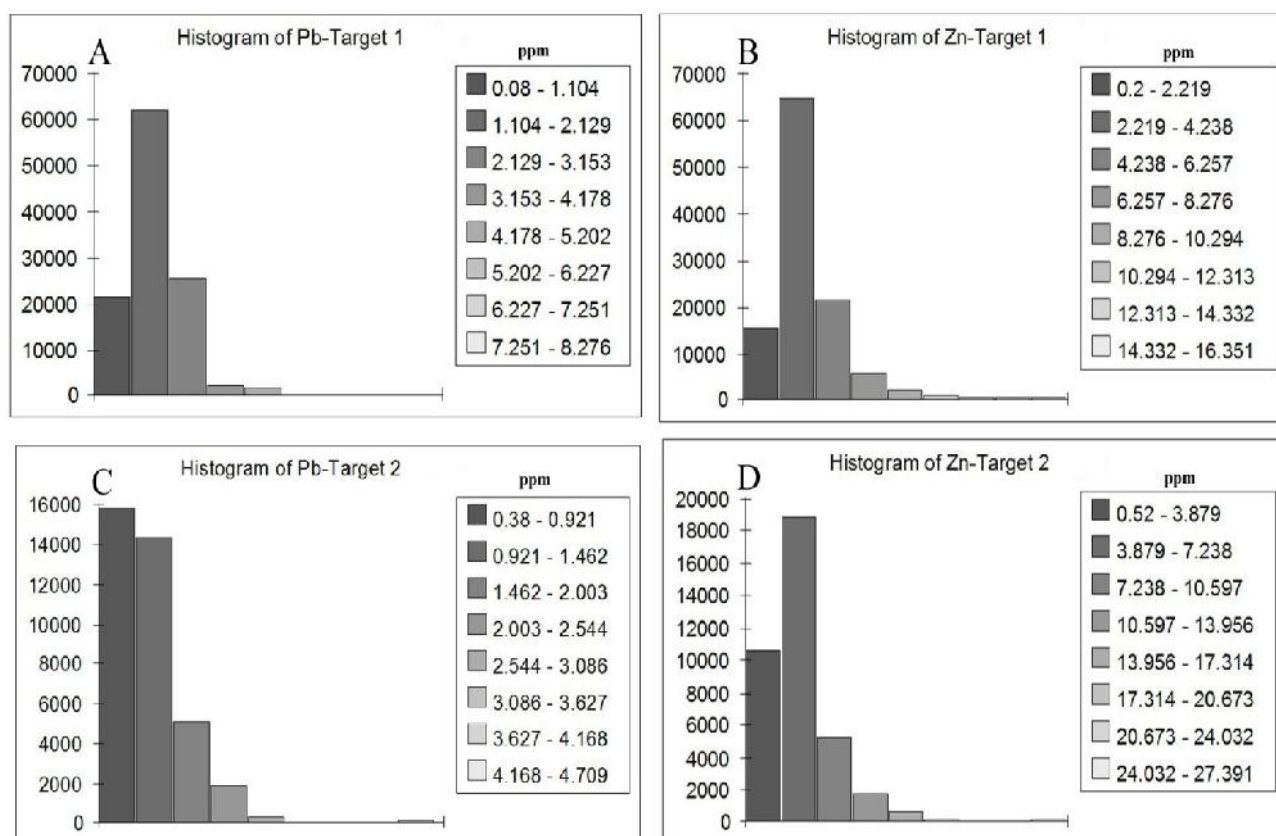
چنانچه بر می‌آید، حدود بی‌هنجاری سرب و روی در غرب، بیشتر از شرق آن بوده ولی شاخص کشیدگی ناحیه شرقی به دلیل فراوانی میزان زمینه بیشتر از غرب تکیه است (غرب کانسار تکیه: کشیدگی سرب =  $۸/۴۳$ ، کشیدگی روی =  $۰/۴۱$ ؛ شرق کانسار تکیه: کشیدگی سرب =  $۱۲/۱۵$ ، کشیدگی روی =  $۱۱/۱۲$ ).

بر اساس نتایج این پژوهش (نمودار شکل ۵)، از تفاوت‌های آشکاری در نحوه توزیع و تمرکز شاخصهای آماری برخوردارند. شکل ۵-A و B به ترتیب هیستوگرام‌های توزیع سرب و روی را در غرب کانسار تکیه نشان می‌دهند (چولگی سرب =  $۱/۷۶$ ، چولگی روی =  $۲/۶۹$ ). همچنین هیستوگرام‌های توزیع سرب و روی در شرق کانسار تکیه به ترتیب در شکل ۵-C و D نشان داده شده است (چولگی سرب =  $۲/۷۱$ ، چولگی روی =  $۲/۶۷$ ).



شکل ۴. گسلها، رخنمون سنگ میزبان و نقاط نمونه‌برداری در غرب (ناحیه ۱) و شرق (ناحیه ۲) کانسار تکیه، برگرفته از گزارش اکتشافات ژئوفیزیکی منطقه هفت- عمارت (Jafari, 2007)

**Fig. 4.** Faults, host unit occurrences and sampling locations in the west (Target 1) and east (Target 2) of Tekieh ore deposit (according to geophysical exploration report of Haft-Emarat, Jafari, 2007)



شکل ۵. A: هیستوگرام فراوانی سرب در غرب کانسار تکیه (ناحیه ۱)، B: هیستوگرام فراوانی روی در غرب کانسار تکیه (ناحیه ۱)، C: هیستوگرام فراوانی سرب در شرق کانسار تکیه (ناحیه ۲) و D: هیستوگرام فراوانی روی در شرق کانسار تکیه (ناحیه ۲)

**Fig. 5.** A: Pb frequency histograms in the west of Tekieh (Target 1), B: Zn frequency histograms in the west of Tekieh (Target 1), C: Pb frequency histograms in the east of Tekieh (Target 2) and D: Zn frequency histograms in the east of Tekieh (Target 2)

بررسی مقدماتی کمیتهای آماری، تفکیک جوامع بی‌هنجاری به دو ناحیه اکتشافی ۱ و ۲ ضروری است و به بهبود طبقه‌بندی اطلاعات زمین می‌انجامد (Bonham Carter, 2001).

**بررسی توزیع خطی بی‌هنجاریها (روش کلاسیک)**  
بخشی از فرآیند پردازش مقدماتی داده‌ها در خلال دستیابی به نمودار توزیع بی‌هنجاریها (شکل ۵) معرفی شد. پایگاه اطلاعات مکانی کانسار تکیه متشکل از ۱۵ پروفیل اکتشافی با فواصل برداشت نامنظم است که پس از ثبت داده‌های مقاومت ویژه قطبش القای الکتریکی، نمونه‌برداری از واحدهای سنگی با تأکید بر رخنمونهای دگرسانی منطقه انجام شده است (Jafari, 2007). بدین ترتیب پایگاه منسجمی از داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی (حدود ۶۰ نمونه) به‌دست

مطابق نمودارهای شکل ۵، میزان کشیدگی و چولگی بیانگر تأثیر فرآیندهای دیرزاد در خلال تحولات ژئوشیمیایی منطقه و توجیه‌کننده افزایش غلظت عناصر اصلی (تیپومورفیک) در عمق مناطق دگرسانی است (Hasani Pak, 2008). مؤلفه‌های متناسب با توزیع خطی کمیتهای ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی کانسار تکیه، طبق جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، کمیتهای مقاومت ویژه و قطبش القای الکتریکی مانند بی‌هنجاریهای سرب و روی از توزیع نرمال با چولگی راست پیروی می‌کند. افزایش نسبی چولگی و کشیدگی در کمیتهای قطبش و مقاومت ویژه الکتریکی (ناحیه ۱)، بیانگر الگوی توزیع متفاوت داده‌ها در مقاطع ژئوالکتریک است که به‌طور مستقیم با رسانایی الکتریکی سازندهای زیرسطحی در ارتباط است (افزایش گرادیان ژئوالکتریک موجب تشدید چولگی ناحیه ۱ شده است) (Calagari, 2010). بنابراین در

همچنین ارتباطی ضعیف، اما معنادار بین بی‌هنجاری سرب و روی با افزایش کمیت قطبش القایی دیده می‌شود (حدود آستانه‌های تغییرات سرب و روی منطبق بر بیشینه قطبش القایی است). همچنین شکل A-۷ و C، بیانگر الگوی توزیع سرب و شکل B-۷ و D، بیانگر الگوی توزیع روی در شرق کانسار تکیه بوده و رابطه آنها با تغییرات پربندی کمیت‌های ژئوالکتریک بررسی شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، همبستگی عیار سرب با تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی از نوع وارونه است؛ درحالی‌که همبستگی تغییرات روی با مقاومت ویژه الکتریکی از نوع مستقیم است. در مورد تغییرات قطبش القایی، مکان هندسی بی‌هنجاری سرب و روی مستقل از نقاط بیشینه بوده است که احتمال کانه زایی درون‌زاد را در عمق هاله‌های دگرسانی نفی می‌کند (Hedenquist et al., 2009).

آمده که در اغلب موارد، مکان هندسی سنجش‌های الکتریکی منطبق بر نقاط نمونه‌برداری ژئوشیمیایی است (Jafari, 2007). درون‌یابی اطلاعات زمین مرجع، با بسته نرم‌افزاری تحلیلگر مکانی و با استفاده از روش "وزن‌گذاری در فواصل معکوس" صورت گرفته است (Bonham Carter, 2001). تولید فایل شبکه با هدف ایجاد پیوستگی فضایی در نقاط برداشت سطحی انجام می‌شود تا امکان تفسیر اطلاعات آماری را فراهم کند (Bonham Carter, 2001).

شکل A-۶ و C بیانگر الگوی توزیع سرب و شکل B-۶ و D بیانگر الگوی توزیع روی در غرب کانسار تکیه هستند که بر حسب تغییرات پربندی مقاومت ویژه و قطبش القای الکتریکی ترسیم شده‌اند. چنان‌که دیده می‌شود، توزیع عناصر در غرب تکیه از مطابقت مکانی معناداری با تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی (افزایش درجه رسانایی سازندها) برخوردار است.

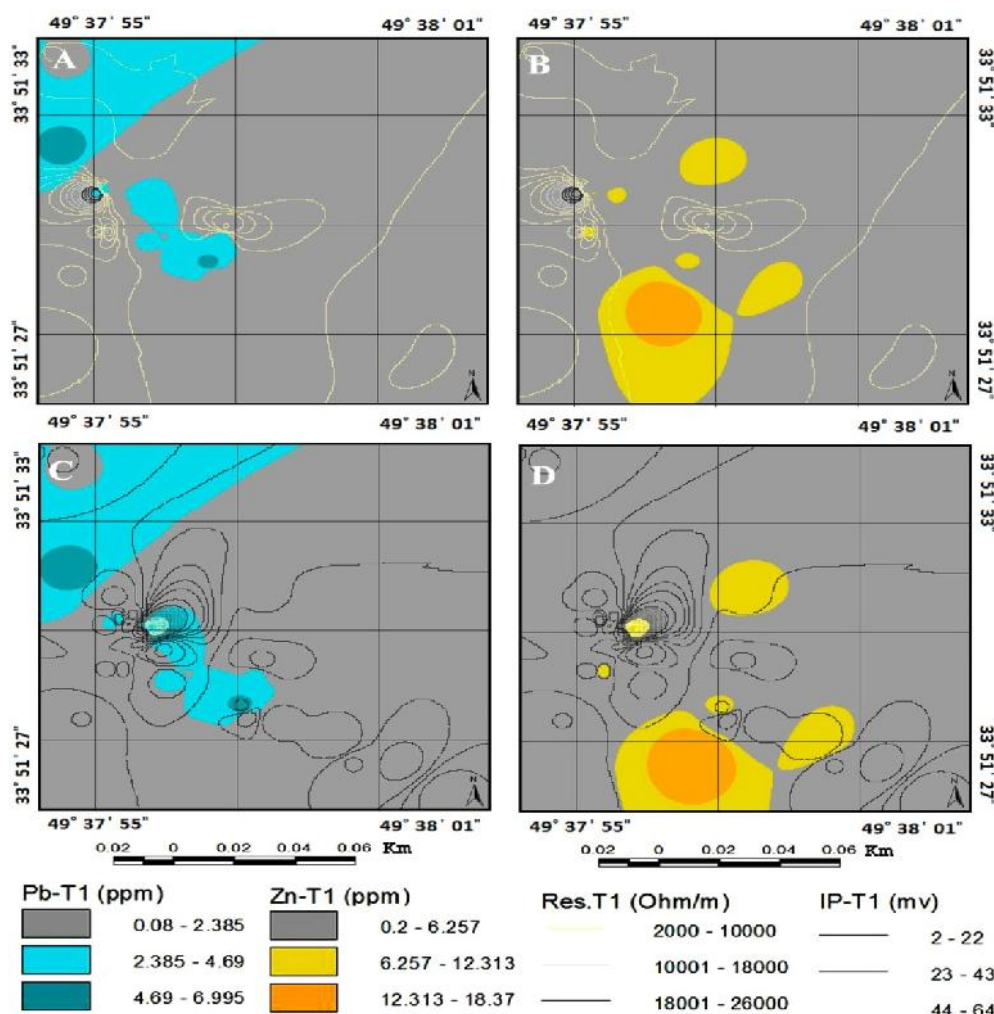
**جدول ۱.** مؤلفه‌های متناسب با توزیع خطی داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی در نواحی غربی (۱) و شرقی (۲) کانسار تکیه (IP = قطبش القایی، Res = مقاومت ویژه الکتریکی، Kurtosis = کشیدگی، Skewness = چولگی، Pierson Coef. = ضریب پیرسون)

**Table 1.** Linear Distribution parameters for geophysical and geochemical databases in the western (Target 1) and eastern (Target 2) regions of Tekieh ore deposit (IP=Induced Polarization, Res=Resistivity)

Targets	Variables	Pierson	Skewness	Kurtosis
1	Pb	0.413	1.763	8.434
	Zn	-0.508	2.692	0.414
	IP	0.235	8.942	17.781
	Res	0.335	5.551	14.859
2	Pb	0.971	2.71	12.15
	Zn	0.498	2.671	11.12
	IP	0.069	0.57	1.7
	Res.	0.588	1.13	1.15

ضعیف بوده و نشان مؤلفه‌های دهنده رفتار مستقل آنها از یکدیگر است. بنابراین نتایج به‌دست آمده از تطابق مکانی بی‌هنجاریها (شکل ۵) با محاسبات جدول ۲ هم‌خوانی ندارد که موجب افزایش خطای سیستماتیک و بروز ابهاماتی در فاز اکتشافات تفصیلی شده است (Torkashvand et al., 2009).

با توجه به تغییر مؤلفه‌های ژئوفیزیکی و رابطه مکانی این تغییرات با توزیع بی‌هنجاریهای سرب و روی، (جدول ۲)، با هدف تعیین همبستگی بین کمیت‌های ژئوشیمیایی (سرب و روی) با مؤلفه‌های ژئوفیزیکی (مقاومت ویژه و قطبش القای الکتریکی) ارائه شده است. در دید کلی، ارتباط هاله ژئوشیمیایی سرب و روی با مؤلفه‌های ژئوالکتریک منطقه



شکل ۶. A: برازش پربندهای مقاومت ویژه الکتریکی با تغییرات عیار سرب در غرب کانسار تکیه (ناحیه ۱)، B: برازش پربندهای مقاومت ویژه الکتریکی با تغییرات عیار روی در غرب کانسار تکیه (ناحیه ۱)، C: برازش پربندهای قطبش القایی با تغییرات عیار سرب در غرب کانسار تکیه (ناحیه ۱) و D: برازش پربندهای قطبش القایی با تغییرات عیار روی در غرب کانسار تکیه (ناحیه ۱) (IP = مقاومت ویژه الکتریکی)

**Fig.6.** A: Correlation between Resistivity contours and Pb variations in the west of Tekieh ore deposit (Target 1), B: Correlation between Resistivity contours and Zn variations in the west of Tekieh ore deposit (Target 1), C: Correlation between Induced Polarization contours and Pb variations in the west of Tekieh ore deposit (Target 1) and D: Correlation between Induced Polarization contours and Zn variations in the west of Tekieh ore deposit (Target 1) (IP= Induced Polarization and Res= Resistivity)

رابطه ۱، معادله عیار- مساحت را بر حسب تغییرات ضریب خط فرکتال (دیمناسیون) نشان داده است (Mandelbrot, 2005).

رابطه ۱:  $\text{Log}(A) = \text{FD} \text{Log}(C)$

در این رابطه، منظور از کمتهای  $\text{Log}(A)$  و  $\text{Log}(C)$  به ترتیب، لگاریتم حاصل از سطوح پربندی و تغییر عیار متناسب با سطوح یادشده است که با استفاده از ضریب خط

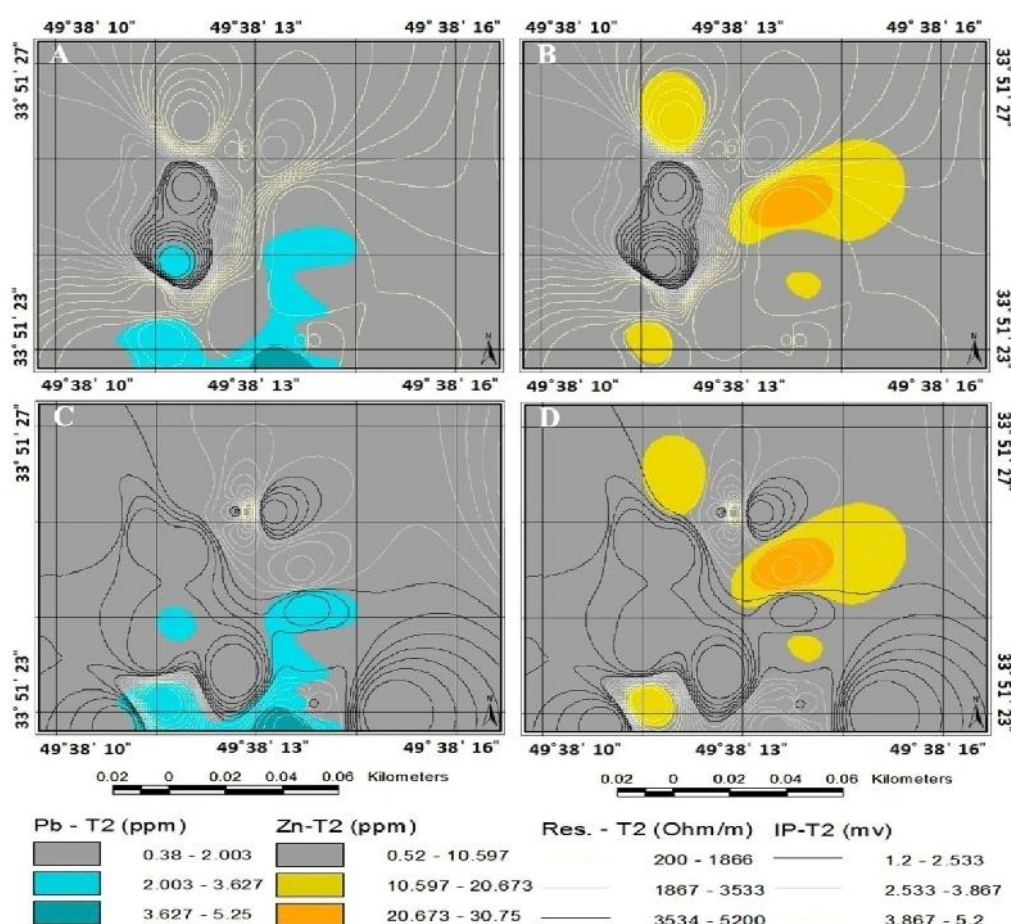
بررسی توزیع غیر خطی بی‌هنجاریها (روش فرکتال)

معادلات فرکتال، برگرفته از توابع خاصی هستند که در پی درون‌یابی داده‌ها و تولید فایل شبکه مورد نیاز، در قالب روابط نسبی نمایی (مانند تغییر عیار متناسب با تغییرات سطح محصور خطوط پربندی) افزاز می‌شوند (Mandelbrot, 2005). بر اساس تعریف بالا، تبدیل توابع نمایی به معادله خط فرکتال، نیازمند استفاده از دستگاه مختصات لگاریتمی است.



تبدیل معادله نمایی به رابطه خطی کمیتهای C و A (رابطه ۱) استفاده می‌شود. تغییرات ضریب خط معادله فرکتال، شاخص جداسازی کمیتهای متناظر از یکدیگر است؛ به طوری که به ازای میزان مختلف FD، تغییر محسوسی در روند نقاط هم‌استقامت به وجود می‌آید که با قطعه‌بندی داده‌ها در تابع چگالی فرکتال همراه است (Mandelbrot, 2005). هر قطعه به منزله معادله خط جداگانه‌ای است که دارای نقاط هم‌استقامت با الگوی توزیع خود سامانده است (Mandelbrot, 2005).

FD به صورت معادله درجه اول بیان شده است. این معادله امکان تفکیک جوامع بی‌هنجاری را بر اساس پیدایش اجزای متناظر و تغییر استقامت آنها در نقطه عطف تابع فرکتال فراهم می‌کند (Mandelbrot, 2005). بر خلاف روشهای کلاسیک، تفکیک فرکتالی میزان زمینه، آستانه و بی‌هنجاری، بدون محاسبه شاخصهای آماری و تنها بر اساس رعایت اصل مشابهتهای زایشی (هم‌یافتی پدیده‌های متناظر در نقاط هم‌استقامت) صورت می‌گیرد. در این روش، پس از محاسبه فراوانی تجمعی سطوح پربندی، از مختصات لگاریتمی به منظور



شکل ۷. A: برازش پربندهای مقاومت ویژه الکتریکی با تغییرات عیار سرب در شرق کانسار تکیه (ناحیه ۲)، B: برازش پربندهای مقاومت ویژه الکتریکی با تغییرات عیار سرب در شرق کانسار تکیه (ناحیه ۲)، C: برازش پربندهای قطبش القایی با تغییرات عیار سرب در شرق کانسار تکیه (ناحیه ۲) و D: برازش پربندهای قطبش القایی با تغییرات عیار سرب در شرق کانسار تکیه (ناحیه ۲) (IP= Induced Polarization و Res= مقاومت ویژه الکتریکی)

**Fig.7.** A: Correlation between Resistivity contours and Pb variations in the east of Tekieh ore deposit (Target2), B: Correlation between Resistivity contours and Zn variations in the east of Tekieh ore deposit (Target 2), C: Correlation between Induced Polarization contours and Pb variations in the east of Tekieh ore deposit (Target 2) and D: Correlation between Induced Polarization contours and Zn variations in the east of Tekieh ore deposit (Target 2) (IP= Induced Polarization and Res= Resistivity)

جدول ۲. همبستگی خطی داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی در نواحی غربی (۱) و شرقی (۲) کانسار تکیه (IP = قطبش القایی، Res = مقاومت ویژه الکتریکی، CV = ضریب انطباق، Slope = شیب خط رگرسیون و Regression Coef. = ضریب همبستگی)

**Table 2.** Linear regression of geophysical and geochemical databases in the western (Target 1) and eastern (Target 2) regions of Tekieh ore deposit (IP=Induced Polarization, Res=Resistivity and CV= Correlation Variation)

Targets	Variables		Statistics		
	Independent	Dependent	Regression Coef.	Slope	CV
1	Pb	IP	0.009	0.322	0.095
	Pb	Res	-0.018	-261.411	-0.136
	Pb	Zn	0	0.011	0.005
	Zn	IP	0.008	0.012	0.092
	Zn	Res	-0.078	-190.081	-0.281
	Zn	Pb	0	0.001	0.005
2	Pb	IP	0.005	0.071	0.071
	Pb	Res	-0.083	-527.694	-0.29
	Pb	Zn	0.005	0.512	0.074
	Zn	IP	0.12	0.051	0.351
	Zn	Res	-0.139	-98.061	-0.373
	Zn	Pb	0.005	0.101	0.074

فرکتال، معیار خودتشابهی سامانه کانه‌زا بر معیار خودتمایلی آن غالب است (Mehrnia, 2013). بنابراین احتمال کانه‌زایی سرب و روی با افزایش نقاط هم‌استقامت و تعدد قطاع فرکتالی افزایش می‌یابد (Mandelbrot, 2005). در شکل ۱۰-A، نتایج تفکیک فرکتالی بی‌هنجاریها، پس از درون‌یابی تغییرات عیار سرب ارائه شده است. همچنین مطابق شکل ۱۰-B- نتایج تفکیک فرکتالی بی‌هنجاریها، پس از درون‌یابی تغییرات عیار روی دیده می‌شود. الگوی توزیع فرکتالی روی در هر دو ناحیه دارای قطعات نسبتاً مشابه است (اگرچه تفاوتی در شیب خط دو تابع دیده می‌شود)؛ اما الگوی توزیع فرکتالی سرب از تفاوت آشکاری برخوردار است که لزوم ناحیه‌بندی اکتشافی کانسار تکیه را توجیه می‌کند.

برازش بی‌هنجاریها با نتایج به‌دست آمده از توزیع خطی سرب و روی (شکل‌های ۶ و ۷) بیانگر وجود تفاوت‌های بارز در مکان و طبقه‌بندی عیار معدنی کانسار تکیه است که راستی‌آزمایی آن با توجه به آثار کانه‌زایی شناخته شده در منطقه، وابسته به آزمون همبستگی جوامع فرکتالی و مقایسه آن با آماره‌های خطی است (جدول ۲). در این مقایسه، حد آستانه بی‌هنجاریها پس از درج قطاع فرکتالی افزایش یافته و شناسایی مناطق امیدبخش را (دارای ناحیه‌بندی و توزیع عناصر کانساری مناسب) در فاصله اطمینان قابل قبول میسر می‌کند. جدول ۳، نتایج همبستگی سرب و روی را بر اساس تغییر مؤلفه‌های ژئوالکتریک و جداسازی بی‌هنجاریها به‌روش فرکتال (شکل ۱۰) نشان داده است.

در این پژوهش، از بسته نرم‌افزاری تحلیلگر مکانی به‌منظور درون‌یابی و طبقه‌بندی داده‌ها و با هدف دستیابی به معادله عیار- مساحت استفاده شده است (Mehrnia, 2013). شکل‌های ۸ و ۹، به ترتیب تابع چگالی فرکتال را برای داده‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی کانسار تکیه نشان می‌دهند. در این شکلها رهیافت جداسازی جوامع با استفاده از معادله عیار- مساحت و با تأکید بر نقاط هم‌استقامت است. حدود بی‌هنجاریهای ژئوشیمیایی (شکل ۸) و ژئوفیزیکی (شکل ۹) در کانسار تکیه، با رعایت اصل مشابهت‌های زایشی و محاسبه تغییرات بعد فرکتال تفکیک شده‌اند. قطعه‌بندی عیار سرب در غرب کانسار تکیه (شکل ۸-A) بیشتر از قطعه‌بندی عیار روی است (شکل ۸-B). به همین ترتیب قطعه‌بندی عیار سرب در شرق کانسار تکیه (شکل ۸-C) بیشتر از قطعه‌بندی عیار روی است (شکل ۸-D).

در شکل ۹-A و C، قطعه‌بندی مقاومت ویژه القای الکتریکی در بخش‌های غربی و شرقی کانسار تکیه به‌دلیل افزایش درجه رسانایی ترکیبات فلزی، به روش وارونه انجام شده است؛ در حالی که مطابق شکل ۹-B و D، قطعه‌بندی قطبش القایی برای نواحی غربی و شرقی کانسار تکیه از روند عادی برخوردار بوده است و جوامع توزیع کمتری دارند. در ضمن، قطاع فرکتالی قطبش القایی در شرق تکیه بیشتر از غرب آن است. وجه تمایز روش فرکتال با روشهای معمول در آمار کلاسیک، شناسایی و تفکیک جوامع بی‌هنجاری بر اساس ظهور مؤلفه‌های متناظر با قابلیت تکرارپذیری بالاست. در آمار

جدول ۳. محاسبه همبستگی غیرخطی داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی در نواحی غربی (۱) و شرقی (۲) کانسار تکیه (IP = قطبش القایی، Res = مقاومت ویژه الکتریکی، CV = ضریب انطباق، Slope = شیب خط رگرسیون و Regression Coef. = ضریب همبستگی)

**Table 3.** Non-linear regression calculation for geophysical and geochemical databases in the western (Target 1) and eastern (Target 2) regions of Tekieh ore deposit (IP=Induced Polarization, Res=Resistivity and CV=Correlation Variation)

Targets	Variables		Statistics		
	Independent	Dependent	Regression Coef.	Slope	CV
1	Pb	IP	0.99	0.59	0.99
	Pb	Res	-0.82	-67.8	-0.91
	Pb	Zn	-0.93	-0.2	-0.96
	Zn	IP	0	0	0.011
	Zn	Res	-0.69	-59.77	-0.832
	Zn	Pb	-0.86	-0.062	-0.925
2	Pb	IP	0.94	0.36	0.972
	Pb	Res	0.631	29.792	0.793
	Pb	Zn	-0.81	-0.46	-0.904
	Zn	IP	0.92	0.033	0.96
	Zn	Res	-0.49	-36.84	-0.701
	Zn	Pb	-0.57	-0.038	-0.75

برای جداسازی جوامع بی‌هنجاری استفاده می‌کند، بنابراین احتمال افزایش ضرایب همبستگی و معنی‌دار شدن رابطه کمیتهای ژئوفیزیکی با ژئوشیمیایی وجود دارد.

- در غرب کانسار تکیه (ناحیه ۱)، تغییرات خطی و غیر خطی Zn/IP ثابت و نزدیک به صفر است. بنابراین بر اساس نتایج آماری، الگوی توزیع بی‌هنجاری روی، مستقل از تغییرات قطبش القایی است و امکان تفسیر آنها وجود ندارد.

- در شرق کانسار تکیه (ناحیه ۲)، تغییرات خطی و غیر خطی Zn/IP معنادار با علامت مثبت است (همبستگی مستقیم روی با قطبش القای الکتریکی). مطابق جدول ۳، ضریب همبستگی این نسبت افزایش چشم‌گیری دارد که بیانگر احتمال کانه‌زایی روی در عمق رخساره‌های دگرسانی است.

- در غرب کانسار تکیه (ناحیه ۱)، تغییرات خطی و غیر خطی Pb/Res بیانگر رابطه وارونه سرب با شاخص مقاومت ویژگی الکتریکی است. (نتایج جدول ۲ و ۳ مشابه یکدیگرند)، حال آن‌که در ضلع شرقی این کانسار (ناحیه ۲)، تغییرات غیر خطی Pb/Res دارای علامت مثبت است (همبستگی مستقیم سرب با مقاومت ویژه الکتریکی). بنابراین در غرب کانسار تکیه با افزایش عیار سرب، درجه رسانایی الکتریکی واحدهای مینرالیزه افزایش می‌یابد که از دیدگاه ژئوفیزیکی با احتمال پیدایش ذخایر سرب با بافت متراکم یا رگه‌ای مطابقت دارد. بر این اساس، توانایی کانه‌زایی سرب در غرب کانسار تکیه

بر اساس جدول ۳ و مقایسه آن با کمیتهای جدول ۲، نکات زیر به دست می‌آید:

- مقدار و نوع همبستگی متغیرها پس از درج ملاحظات فرکتال، تغییر می‌کند، به طوری که در بیشتر موارد با افزایش کمی ضرایب آماری (جدول ۳) مواجه هستیم.

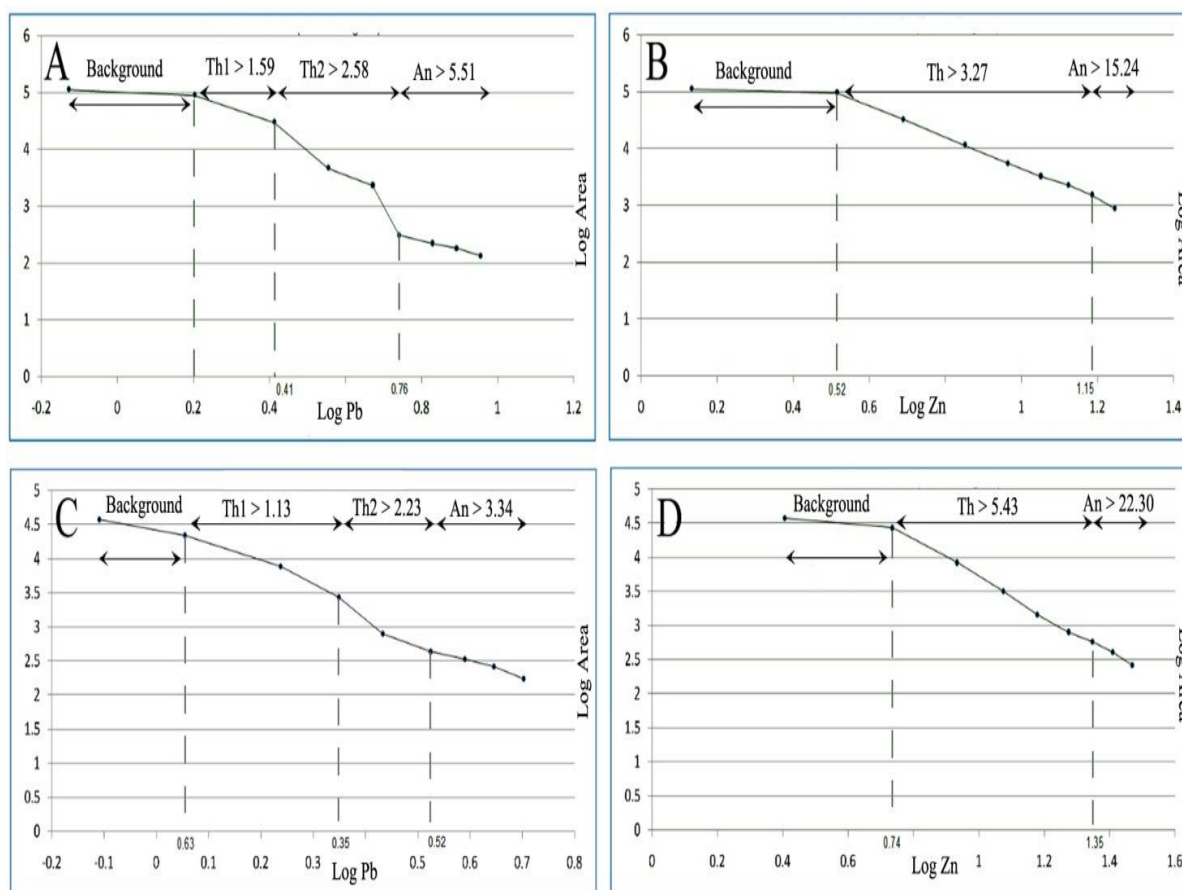
- تغییر علامت ضریب همبستگی در برخی موارد دیده می‌شود که از آن جمله می‌توان به تغییر علامت ضریب یادشده در جفت متغیرهای Pb/Zn، Pb/Res و Zn/Pb اشاره کرد.

- در توزیع خطی عناصر کانساری (تیپومورفیک)، تغییرات نسبی Zn/Pb یا Pb/Zn مستقل از یکدیگرند (جدول ۲، ضریب همبستگی سرب و روی نزدیک به صفر است). چنین تحلیل آماری با الگوی توزیع مکانی رگه‌های معدنی در هاله دگرسانی کانسار تکیه مغایرت دارد (عدم مطابقت مشاهدات با محاسبات آماری).

- الگوی توزیع غیر خطی Pb و Zn، مؤید افزایش ضریب همبستگی در نسبتهای Pb/Zn، Zn/Pb با علامت منفی است. در ذخایر اگزالاتیو (هم‌زاد با فعالیتهای آتشفشانی)، احتمال کانه‌زایی سرب (در شرایط روی کانساری) و روی (در شرایط زیر کانساری) وجود دارد. بنابراین عیار کانه‌زایی سولفیدی با افزایش عمق هاله‌های دگرسانی نسبت مستقیم دارد و شاخص نسبی Pb/Zn با عمق کاهش می‌یابد. برتری این روش (فرکتال) آن است که از ویژگی کمیتهای متناظر

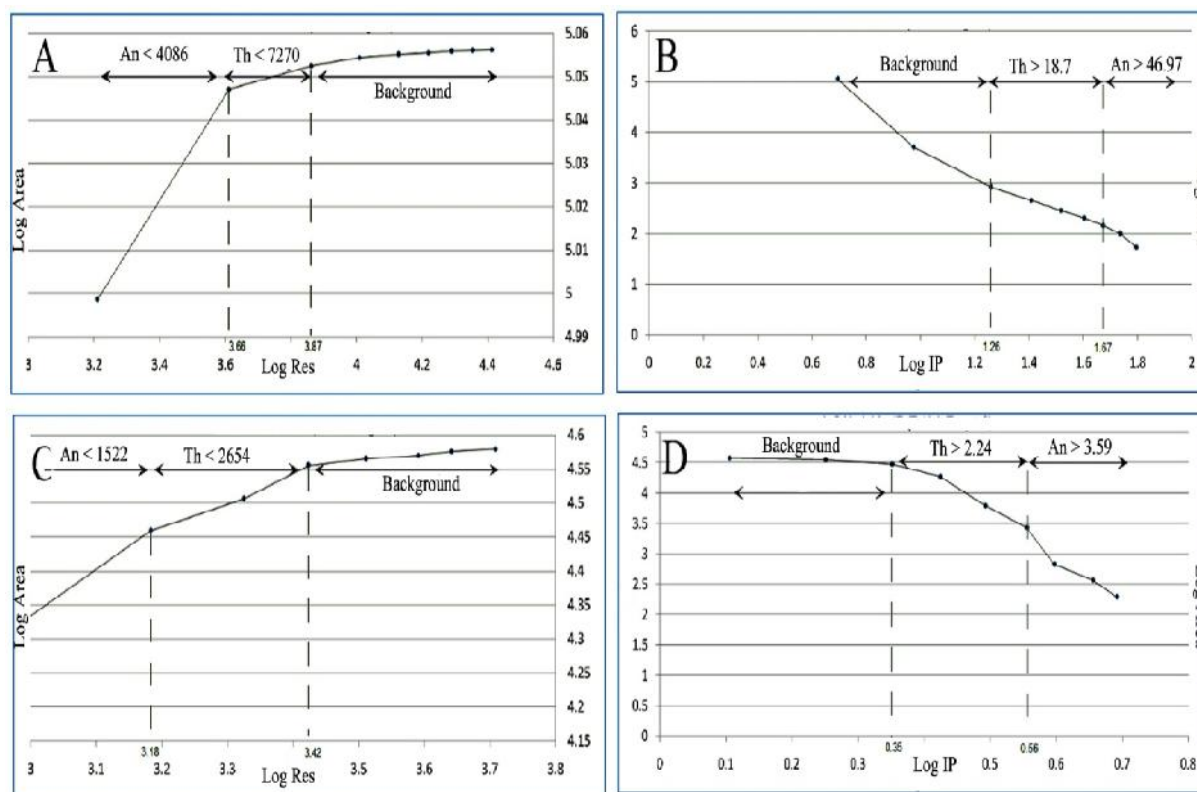
هستیم که این فرآیند، متناسب با عمق کانه‌زایی، موجب کاهش عیار سرب شده است (به دلیل همبستگی مستقیم  $Pb/Res$ ) و بر تعداد مناطق حاوی کانه‌زایی روی افزوده می‌شود (همبستگی معکوس  $Zn/Res$  بیانگر کاهش مقاومت ویژه الکتریکی مینرالیزه به ازای افزایش عیار روی است). در فرض دوم، با کمبود یا نبود کانه‌زایی سرب مواجه هستیم، که متناسب با افزایش عمق دگرسانی و حاکمیت شرایط احیایی ( $Eh < 0$ )، کانه اسمیترونیت جای خود را به اسفالریت با بافت پراکنده می‌دهد که این جانشینی با تغییرات نسبی قطبش القایی همراه بوده است. لازم به ذکر است که فرض دوم با نتایج بررسی‌های میکروسکوپی شرق تکیه مطابقت بیشتری دارد.

بیشتر از شرق آن است؛ ولی این پدیده به افزایش ضخامت قشر هوازده در واحد کانه‌دار شرقی نیز مربوط می‌شود. عیار فرکتالی سرب و روی در هر دو ناحیه غربی و شرقی کانسار تکیه (۱ و ۲)، متناسب با تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی است. روند ضریب همبستگی در غرب تکیه، با احتمال کانه‌زایی سرب (درون‌زاد-احیایی) در عمق رخساره‌های دگرسانی ارتباط دارد؛ اما در ناحیه شرقی از معیارهای ژئوالکتریکی لازم برای غنی‌شدگی درون‌زاد سرب برخوردار نیست. از طرف دیگر، همبستگی معنادار روی با تغییرات قطبش القایی در شرق کانسار تکیه، با دو فرض به‌دست آمده بر فرآیند غنی‌شدگی ارتباط دارد. در فرض اول، شاهد افزایش احتمالی روی به ازای نسبت تغییرات  $Pb/Zn$



شکل ۸. A: تابع چگالی عیار- مساحت برای تفکیک بی‌هنجاری سرب در غرب تکیه (ناحیه ۱)، B: تابع چگالی عیار- مساحت برای تفکیک بی‌هنجاری سرب در غرب تکیه (ناحیه ۱)، C: تابع چگالی عیار- مساحت برای تفکیک بی‌هنجاری سرب در شرق تکیه (ناحیه ۲) و D: تابع چگالی عیار- مساحت برای تفکیک بی‌هنجاری روی در شرق تکیه (ناحیه ۲) (Background = زمینه، Th = آستانه و An = بی‌هنجاری)

**Fig. 8.** A: Area-Concentration density function for separating Pb anomalies in the west of Tekieh (Target 1), B: Area-Concentration density function for separating Zn anomalies in the west of Tekieh (Target 1), C: Area-Concentration density function for separating Pb anomalies in the east of Tekieh (Target 2) and D: Area-Concentration density function for separating Zn anomalies in the east of Tekieh (Target 2) (Background, Th=Threshold and An=Anomaly)



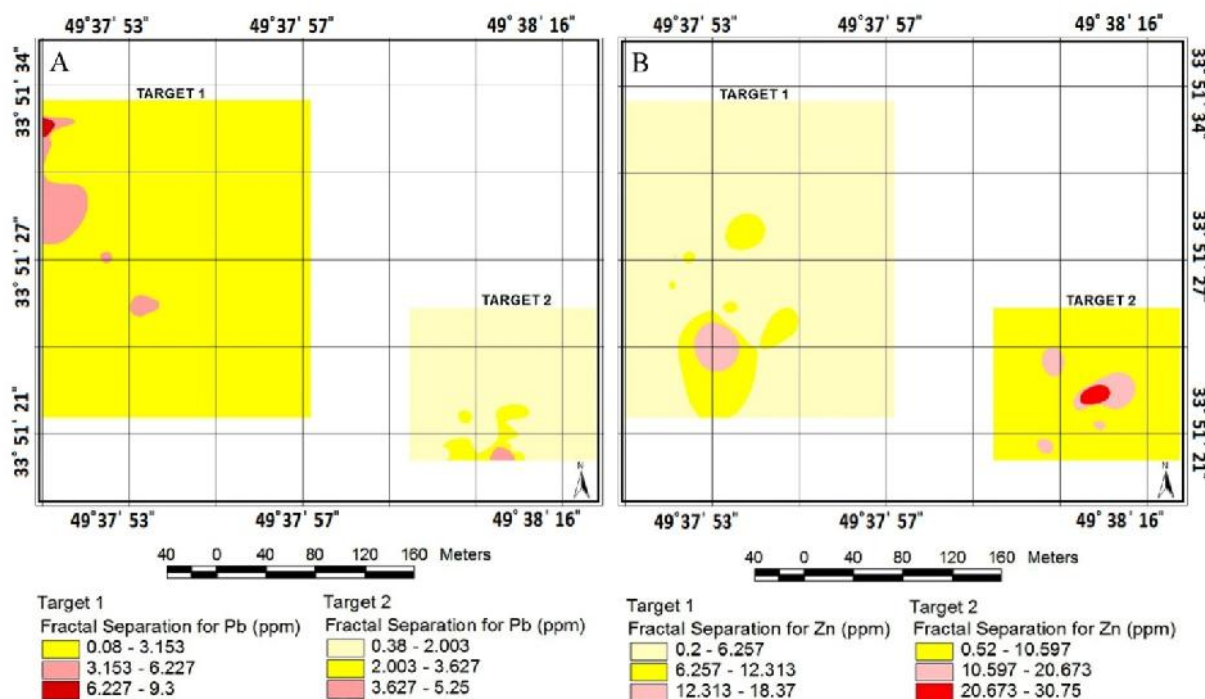
شکل ۹. A: تابع چگالی عیار- مساحت برای تفکیک بی‌هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی در غرب تکیه (ناحیه ۱)، B: تابع چگالی عیار- مساحت برای تفکیک بی‌هنجاری قطبش القایی در غرب تکیه (ناحیه ۱)، C: تابع چگالی عیار- مساحت برای تفکیک بی‌هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی در شرق تکیه (ناحیه ۲) و D: تابع چگالی عیار- مساحت برای تفکیک بی‌هنجاری قطبش القایی در شرق تکیه (ناحیه ۲) (Background = زمینه، Th = آستانه، An = بی‌هنجاری، Res = مقاومت ویژه الکتریکی و IP = قطبش القایی)

**Fig. 9.** A: Area-Concentration density function for separating Resistivity anomalies in the west of Tekieh (Target 1), B: Area-Concentration density function for separating Induced Polarization anomalies in the west of Tekieh (Target 1), C: Area-Concentration density function for separating Resistivity anomalies in the east of Tekieh (Target 2) and D: Area-Concentration density function for separating Induced Polarization anomalies in the east of Tekieh (Target 2) (Background, Th=Threshold, An=Anomaly, Res.=Resistivity and IP=Induced Polarization)

### مطالعات میکروسکوپی

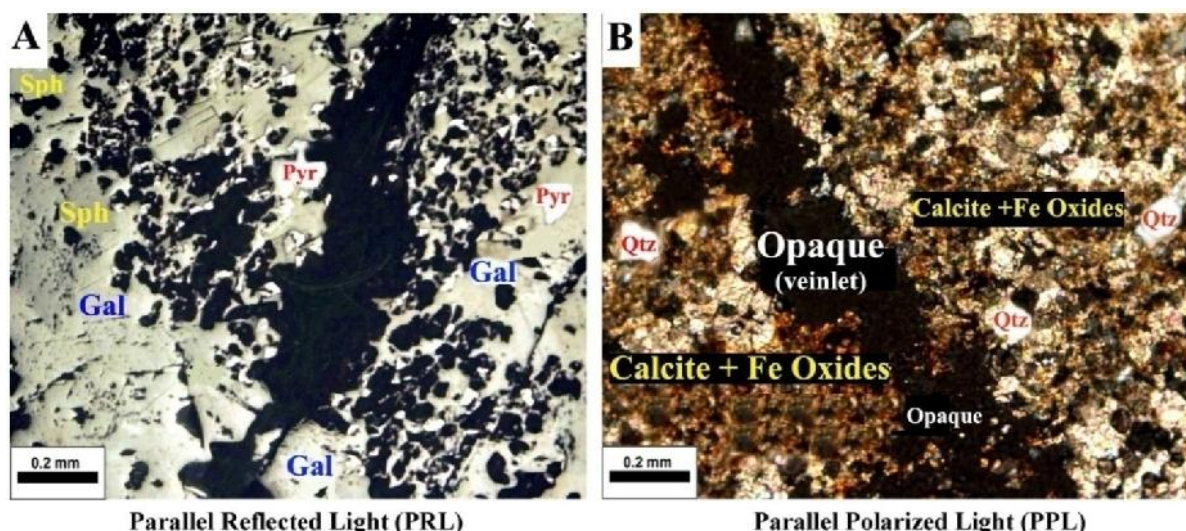
در پی مشاهدات زمین‌شناسی و نمونه‌برداری از رخنمونهای مستعد، ریزکانه‌شناسی سرب و روی در دو ناحیه شرقی و غربی کانسار تکیه انجام شده است. شکل ۱۱ مقطع میکروسکوپی یکی از نمونه‌های به‌دست آمده از غرب تکیه را نشان داده است. در شکل A-۱۱، شاهد پیدایش کانه‌های سولفیدی در امتداد رگه‌چه‌ها با بافت پرکننده فضای خالی هستیم (نور انعکاسی). کانه اصلی قشر هوازده، از نوع کروسیت و اسمیترونیت است که در محل ترانشه‌ها به‌صورت هم‌یافتی با گالن و اسفالریت دیده می‌شود. در شکل B-۱۱، ترکیب کانیایی سنگ میزبان متشکل از رخساره اکسیدی- کربناتی است که به‌طور مشخص دارای کلسیت، دولومیت و هیدروکسیدهای آهن است. کربنات‌ها به‌طور پراکنده توسط کانیهای سیلیس (کوارتز) همراهی شده و قشر هوازده کانسار را در ضلع غربی آن پوشش می‌دهند (کمتر از ۳ متر).

با توجه به نتایج تحلیل‌های فرکتالی، روند غنی‌شدگی سرب با افزایش عمق کانه‌زایی در غرب کانسار تکیه متناسب بوده است و به تدریج شاهد کاهش نسبی گالن و افزایش اسفالریت خواهیم بود (آثار ناحیه‌بندی ژئوشیمیایی در ذخایر کانساری غرب تکیه). همچنین نتایج مشابهی از هم‌یافتی کانه‌های روی با ترکیبات اکسیدی- هیدروکسیدی آهن در ضلع شرقی کانسار تکیه به‌دست آمده است که مشخصات ریزکانه‌شناسی آن در شکل ۱۲ دیده می‌شود.



شکل ۱۰. نقشه‌های پربندی سرب و روی تکیه که با استفاده از روش کریجینگ و رعایت ابعاد سلولی ایزومتریک (۱۰۰ مترمربع) درون‌یابی شده‌اند. A: الگوی توزیع سرب در کانسار تکیه با تفکیک جوامع زمین، آستانه و بی‌هنجاری به‌روش فرکتال و B: الگوی توزیع سرب در کانسار تکیه با هدف تفکیک جوامع زمین، آستانه و بی‌هنجاری به‌روش فرکتال (Target 1 = ناحیه هدف غربی و Target 2 = ناحیه هدف شرقی)

**Fig. 10.** Tekieh Pb-Zn contoured maps by using Krigging method under an isometric cell size value (100 square meter) A: Tekieh Pb distribution pattern for separating background, threshold and anomalous populations by fractals, and B: Tekieh Zn distribution pattern for separating background, threshold and anomalous populations by fractals (Target 1= western target and Target 2= eastern target)

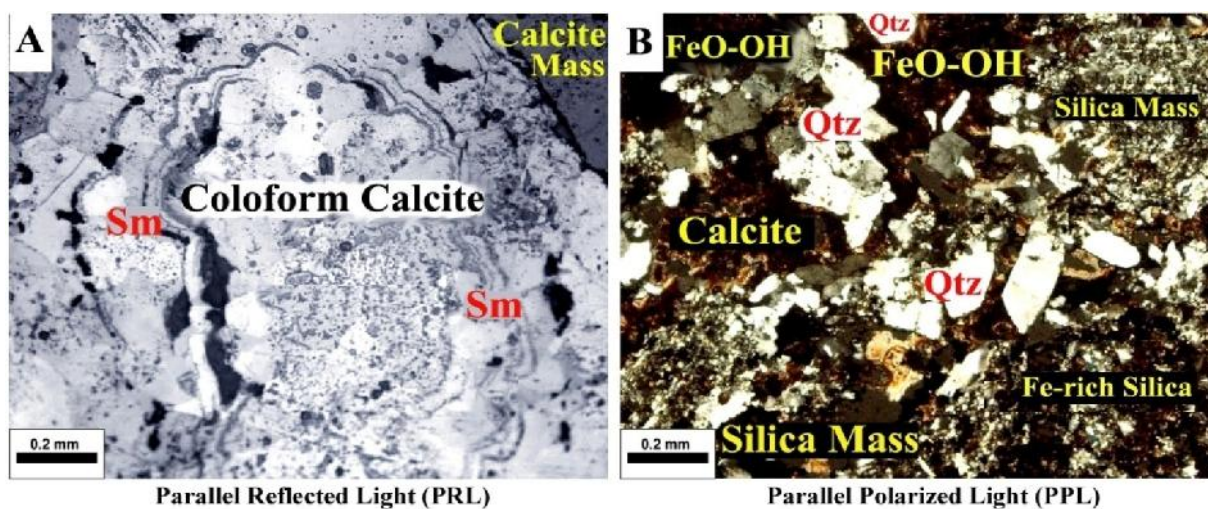


شکل ۱۱. مشخصات میکروسکوپی نمونه معدنی متعلق به غرب کانسار تکیه. A: هم‌یافتی گالن، پیریت و اسفالریت (نیکول موازی، بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر) و B: رخساره اکساکربناتی هوازده در سنگ میزبان دولومیت کوارتزار (نور عادی، بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر) (Pyr = پیریت، Gal = گالن، Sph = اسفالریت و Qtz = کوارتز)

**Fig. 11.** Mine Samples Micrographs from west of Tekieh ore deposit. A: Paragenesis of Galena, Pyrite & Sphalerite (PRL, 100x) and B: Oxidized carbonate facies within dolomite-quartzitic host unit (PPL, 100x). (Pyr = Pyrite, Gal = Galena, Sph = Sphalerite and Qtz = Quartz)

شده و در فضای خالی سنگ یا اطراف ساختمانهای کلوفرمی تجمع یافته‌اند. در شکل B-۱۲، ترکیب کانیاپی سنگ میزبان متشکل از رخساره سیلیسی-کربناتی حاوی کلسیت و چرت‌های آهن‌دار است. زمینه اصلی دگرسانی شامل کانیه‌های سیلیس با بافت شیشه‌ای تا متبلور است. اگرچه آثار کانیه‌زایی سولفیدی در رخنمونهای دگرسانی این ناحیه کمیاب است؛ اما با توجه به نتایج تحلیلهای فرکتالی، غنی‌شدگی درون‌زاد روی در عمق مناطق دگرسانی دور از انتظار نیست.

ظهور بافت کلوفرمی، بیانگر فرآیند کانیه‌زایی دیرزاد با منشأ گرمایی سرد است (Hedenquist et al., 2009) که در حین جوشش سیال کانیه‌دار و در حضور ترکیبات اکسیدی-هیدروکسیدی آهن، شرایط ناپایداری کمپلکس‌های کربناتی فراهم شده است و کانیه اسمیترونیت تشکیل می‌شود. در شکل A-۱۲، ترکیب کانیاپی قشر هوازده (با ضخامت بیش از ۸ متر) دارای زمینه کلسیت کلوفرمی است که در حاشیه آن نوارهای باریک اسمیترونیت دیده می‌شود. در این مقطع، رگه‌چه‌های دارای هماتیت، گوتیت و لیمونیت به شدت اکسید



شکل ۱۲. مشخصات میکروسکوپی نمونه‌های معدنی در شرق کانسار تکیه. A: کانیه‌زایی کربنات روی (اسمیترونیت) در مجاورت کلسیت با بافت گل‌کلمی (کلوفرمی) (نیکول موازی، بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر) و B: رخساره سیلیسی کربناتی حاوی هیدروکسیدهای آهن و کوارتز بلورین در سنگ میزبان فلزات پایه (نور پلاریزه، بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر) (Sm = اسمیترونیت، FeO-OH = هیدروکسیدهای آهن، Coloform Calcite = کلسیت با بافت گل‌کلمی، Calcite Mass = زمینه کربناتی، Silica Mass = زمینه سیلیسی، Fe-rich Silica = سیلیس سرشار از آهن و Qtz = کوارتز)

**Fig. 12.** Mine Samples Micrographs from east of Tekieh ore deposit. A: Zinc-carbonate mineralization (Smithsonite) nearby coloform calcite (PRL, 100x) and B: Silicified carbonate facies rich of Fe-Oxides and crystalline Quartz in host unit of basic metals (PPL, 100x). (Sm = Smithsonite, FeO-OH = Iron Hydroxides and Qtz = Quartz)

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

سرشار از هیدروکسیدهای آهن پدید آمده است. صرف نظر از سازوکار غنی‌شدگی این ناحیه، رابطه توزیع ژئوشیمیای سرب و روی با تغییر مؤلفه‌های ژئوالکتریک (مقاومت ویژه و قطبش القایی) قابل تأمل است؛ اما به دلیل ضعف آمار کلاسیک در ارزیابی ضرایب همبستگی داده‌ها، ابهاماتی در مراحل تعبیر و تفسیر مقاطع ژئوالکتریک مطرح می‌شود که پاسخ‌گویی به آنها نیازمند بهره‌گیری از روش فرکتال با تأکید بر پیدایش مؤلفه‌های متناظر ژئوفیزیکی - ژئوشیمیایی برای تفکیک فرآیند کانیه‌زایی کانساری از نوع پراکنده و کم عیار است. در

کانسار تکیه بخشی از واحد چینه‌ای منسوب به فعالیت‌های رسوبی-آتشفشانی مزوزوئیک است که از توانایی کانیه‌زایی فلزات پایه در فاز اگزالاتیو برخوردار بوده است. رویداد کانیه‌زایی سرب و روی به دو صورت هم‌زاد (عدسیه‌های موازی با لایه‌بندی سنگ میزبان) و دیرزاد (پیدایش رگه‌ها و رگه‌چه‌ها)، موجب تغییرات فیزیکوشیمیایی سنگ میزبان کربناتی شده و آثار کانیه‌زایی برون‌زاد در بین فعالیت‌های زمین‌ساختی پالئوژن و در پی دگرسانی سیلیسی-کربناتی

- در سطح پیمایش این کانسار، توالی ژئوشیمیایی و ناحیه‌بندی مترتب بر ذخایر دیرزاد مشاهده نمی‌شود؛ اما در مقاطع ژئوالکتریک، منطقه غنی‌شده (درون‌زاد- احیایی) از درجه رسانایی و قابلیت قطبش القایی خوبی برخوردار است که به دلیل گوناگونی جوامع بی‌هنجاری و افزایش قطاع فرکتالی (رابطه ۱)، احتمال می‌زبانی واحد کربناتی در بخش‌های عمیق‌تر وجود دارد. در این میان فرآیند غنی‌شدگی هم‌زاد محتمل‌تر از نوع دیرزاد است؛ زیرا در یک سامانه دیرزاد، توسعه هاله‌های دگرسانی و ناحیه‌بندی ژئوشیمیایی سنگ درون‌گیر دارای روند تدریجی اما مشهود است که به جز بخش‌های محدودی در غرب کانسار تکیه، در سایر نواحی دیده نمی‌شود.

- مؤلفه‌های ژئوالکتریک غرب کانسار تکیه بیانگر احتمال پیدایش رگه‌های سرب و روی به ازای افزایش ضریب همبستگی  $Pb/Res$  و  $Zn/Res$  با علامت منفی است (کاهش مقاومت ویژه الکتریک، جدول ۳). بنابراین ادامه فعالیت‌های اکتشافی این ناحیه مورد تأیید روش فرکتال بوده و دستیابی به ذخایر غنی‌شده سرب (در عمق کم دگرسانی) دور از انتظار نخواهد بود.

- مؤلفه‌های ژئوالکتریک شرق کانسار تکیه بیانگر احتمال پیدایش رگه‌های روی (در حضور یا نبود کانه‌زایی پراکنده سرب) بوده است و افزایش معناداری در همبستگی فرکتالی روی با تغییرات قطبش القایی و درجه رسانایی سازندهای مستعد (جدول ۳) دیده می‌شود. بنابراین ادامه فعالیت‌های اکتشافی این ناحیه با هدف دستیابی به ذخایر غنی‌شده روی مورد تأیید روش فرکتال است.

- تحلیل انجام شده از یافته‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی کانسار تکیه جنبه کیفی دارد و دستیابی به شاخص‌های کمی از قبیل عیار، ضخامت ماده معدنی، عمق واحد کانه‌دار و حجم ذخیره در حوزه تخصصی این پژوهش نیست.

- روش ارائه شده در این پژوهش، یک رهیافت آماری جدید برای تحلیل رابطه کمیت‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی از دیدگاه غیر خطی است که نتایج آن با معرفی مناطق مستعد و ارائه راهکارهای نوین جهت ادامه اکتشافات تفصیلی کانسار تکیه همراه بوده است. بدین ترتیب با سنجش تغییرات بعد فرکتال، شاخص خودسامان‌دهی هاله‌های ژئوشیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفته و حدود بی‌هنجاری‌های سرب و روی

این پژوهش، برای نخستین بار روش مقایسه داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی با استناد بر اصول تحلیلهای غیر خطی و مقایسه نتایج آن با آماره‌های خطی معرفی شده است. همچنین از دیدگاه تجربی، اهمیت الگوی توزیع فرکتالی در تحلیل بی‌هنجاریها و تفکیک آنها بر اساس اولویتهای اکتشافی کانسار تکیه مد نظر بوده است. روش فرکتال با شناسایی دقیق مکان بی‌هنجاری بیشینه و مطابقت آن با سایر کمیتها، موجب معنی‌دار شدن ضرایب همبستگی شده است و توالی کانه‌ها را بر اساس الگوی توزیع ژئوشیمیایی (در محیط پساماگمایی) استنتاج می‌کند. بدین ترتیب از معادله لگاریتمی عیار- مساحت با هدف شناسایی جوامع متناظر ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی کانسار تکیه استفاده شده که با مقایسه و تجمیع نقاط هم‌استقامت، تفسیری از تغییرات مقاومت ویژه الکتریک، قطبش القای الکتریک و گرادیان‌های سرب و روی انجام شده است. بر اساس الگوی توزیع غیر خطی داده‌ها، نظم کانیایی حاکم بر ناحیه غربی کانسار تکیه توسط یافته‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی قابل استنتاج است. در نتیجه کانه‌زایی سرب و در پی آن غنی‌شدگی روی در ناحیه، اثر هاله‌های دگرسانی غرب تکیه دور از انتظار نیست. در این ناحیه، بی‌هنجاریهای سرب و روی هم‌پوشانی مکانی ندارند (شکل ۱۰)؛ اما بر اساس نتایج فرکتال (جدول ۳)، گسترش هاله سرب، محدود به سطح تا اعماق کم کانسار بوده و با بیشتر شدن عمق ذخیره، احتمال کانه‌زایی روی (با بافت پراکنده) افزایش می‌یابد. هم‌یافتی گالن و اسفالریت در زمینه سرشار از کانیهای اکسیدی- کربناتی (شکل ۱۱)، بیانگر درستی معادله فرکتال در تفسیر یافته‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی گستره غربی است.

- در شرق کانسار تکیه، بی‌هنجاریهای سرب و روی از هم‌پوشانی ضعیف تا متوسطی برخوردارند که بر اساس نتایج این پژوهش (جدول ۳)، احتمال کانه‌زایی سرب ضعیف است و نسبت  $Pb/Zn$  با افزایش عمق ذخیره کاهش می‌یابد. فراوانی اسمیترونیت در حاشیه رگه‌ها و امتداد رگه‌چه‌های کلسیت- کلوفرمی (شکل ۱۲)، نشان‌دهنده درستی معادله فرکتال در گستره شرقی کانسار است. هم‌یافتی کلسیت- اسمیترونیت- دولومیت در قالب بافت کلوفرمی، با فرآیند غنی‌شدگی دیرزاد عنصر روی در فاز جوشش سیالات گرمایی (شکل ۱۲) مطابقت دارد.



کانیایی شاخص (اسمیتزونیت-اسفالریت)، امکان توسعه شبکه برداشت زیرزمینی با حفر چاهک فراهم می‌شود.

- در شرق کانسار تکیه، منطقه عیار بیشینه روی (طول ۴۹۳۸۱۵ و عرض ۳۳۵۱۲۲) برای حفر چاهک با امکان برداشت نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی پیشنهاد می‌شود. در ادامه و بر حسب تغییر عیار نمونه‌های مورد نظر (با تأکید بر افزایش عیار روی در کانه‌های سولفیدی)، امکان توسعه شبکه برداشت زیرزمینی در امتداد گمانه‌های اکتشافی فراهم خواهد شد. همچنین در این ناحیه، محدوده عیار بیشینه سرب (طول ۴۹۳۸۱۴ و عرض ۳۳۵۱۲۰)، معیارهای لازم را برای ادامه فعالیت‌های اکتشافی در فاز تفصیلی ندارد. بنابراین، در این منطقه تنها به حفر چند ترانشه اکتفا می‌شود، تا امکان شناسایی ترکیب کانیایی سنگ میزبان را در عمق بیشتری از لایه هوازده فراهم کند.

تفکیک شدند. استفاده از توابع فرکتالی موجب افزایش ضرایب همبستگی داده‌ها و برازش مکانی کمیت‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی شد که در مقایسه با روش‌های تحلیل خطی، احتمال دستیابی به مناطق پر عیار عمقی را افزایش داده و وجود نواحی غنی‌شده در عمق مناطق دگرسانی دور از انتظار نیست.

- در غرب کانسار تکیه، منطقه عیار بیشینه سرب (طول ۴۹۳۷۵۱ و عرض ۳۳۵۱۳۱) برای حفر چاهک با امکان برداشت نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی پیشنهاد می‌شود. در ادامه بر حسب تغییر عیار نمونه‌های مورد نظر، امکان توسعه شبکه برداشت زیرزمینی در امتداد گمانه‌های اکتشافی فراهم خواهد شد. همچنین در این ناحیه، محدوده عیار بیشینه روی (طول ۴۹۳۷۵۳ و عرض ۳۳۵۱۲۳) به‌منظور حفر ترانشه، نمونه‌برداری از رخنمون‌های کانه‌دار و شناسایی توانایی کانه‌زایی روی مناسب است. در صورت مشاهده تغییرات

## References

- Aghanabati, A., 2010. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 527 pp.
- Anells, R.N., Arthurton, R.S., Bazley, R.A.B., Davies, R.G., Hamed, M.A.R. and Rahimzadeh, F.R., 1985. Geological Map of Shazand – Khomein. Scale: 1:100000, Cartographic Department of Geological Survey of Iran.
- Bonham Carter, G.F., (translated by Geo information System Group), 2001. Geographic information System for Geoscientists. Geological Survey of Iran, Tehran, 562 pp.
- Calagari, A.A., 2010. Principles of geophysical explorations. University of Tabriz, Tabriz, 485 pp.
- Hasani Pak, A.A., 2008. Geochemical Explorations. University of Tehran, Tehran, 615 pp.
- Hedenquist J.W., Arribas, A. and Izawa, E., 2009. Epithermal gold deposits, styles, characteristics and Exploration. American Society of Resource Geology, New York, 83 pp.
- Jafari, H., 2007. Using geoelectrical techniques for Zn-Pb explorations in Haft-Emarat district, Tekieh region (South East of Arak). Kimya Kavan Tosee Novin Company, Tehran, 206 pp.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh, A. and Haidarian, M.R., 2008. Ore deposit exploration. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, 632 pp.
- Mandelbrot, B., 2005. Fractal Geometry of Nature. W.H Freeman & Company, New York, 468 pp.
- Mehrnia, S.R., 2013. Application of fractal geometry for recognizing the pattern of textural zoning in epithermal deposits: (case study: Shikhdarabad Au-Cu indices, East-Azerbaijan province). Journal of Economic Geology, 5(1): 23-36. (in Persian)
- Momenzadeh, M., 1976. Stratabound Lead – Zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic ores in the Malayer – Esfahan district (west central Iran) lithology, metal content, zonation and genesis. Unpublished Ph.D. Thesis, Heidelberg university, Heidelberg, Germany, 300 pp.
- Momenzadeh, M. and Ziseman, H., 1981. Lead – Zinc re mineralization potentials in Malayer – Esfahan district. Journal of Ore Deposit, 3(1): 88-101.
- Salehi, L., 2004. Geochemistry of REE content in Tekieh Pb-Zn ore deposit. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 181 pp.
- Torkashvand, S., Mehrnia, S.R. and Moghaddasi, S.J., 2009. Co-Processing of the geophysical

---

parameters for Tekieh Zn-Pb ore deposits  
(south east of Arak). 4<sup>th</sup> PNU Geological

National Conference, Payam Noor University  
of Mashhad, Mashhad, Iran.



## Application of Fractal Technique for Analysis of Geophysical - Geochemical Databases in Tekieh Pb-Zn Ore Deposit (SE of Arak)

Seyed Reza Mehrnia\*

Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Submitted: Dec. 18, 2014

Accepted: Aug. 4, 2015

**Key Words:** *Fractal, Nonlinear Distribution, Statistical Techniques, Tekieh Ore Deposit.*

### Introduction

Tekieh Lead-Zinc ore deposit that is located in the Sanandaj-Sirjan structural zone has been recognized as one of the most important mineralized regions in Malayer-Isfahan metallogenic sub-state, south east of Arak (Momenzadeh and Ziseman, 1981). Carbonate host units have been developed along (or across) the Vishan-Tekieh anticline as the main structure extended in NW-SE trends (Annells et al, 1985). According to geochemical investigations (Salehi, 2004), the element content of the mineralized regions has originated from Alpine post-volcanisms and subsequently it has migrated toward early Cretaceous formations (dolomitic limestones) among several hypogenic stages (Torkashvand et al., 2009). Also echelon type structures consisting of folded systems and inversed faulting of structures are the most common features in western and eastern parts of ore deposit regions (Annells et al, 1985). Syngenetic enrichments beside limited (rarely developed) epigenetic mineralization have been known as two main phases which are closely relevant to ore forming processes in the massive lenses and vein type occurrences, respectively (Momenzadeh and Ziseman, 1981).

### Material and Methods

In this research, two statistical techniques that consist of classical and fractal equations (Mandelbrot, 2005) were applied in geochemical (Torkashvand et al., 2009) and geophysical (Jafari, 2007) databases for obtaining the linear and nonlinear distributions of geochemical

elements (Tekieh Pb-Zn content) in association with resistivity variations and induction polarization measurements (Calagari, 2010). According to linear statistical techniques (Torkashvand et al., 2009), the main central parameters such as mean, median and mode in addition to variances and standard deviations as distribution tendencies could be used for obtaining the regression coefficients of the databases. However, in fractal statistics, a reliable regression between geoelectrical - geochemical anomalies should be calculated based on measuring the fractal dimensional variations in the recursive patterns (Mehrnia, 2013). In practice, the Area-Concentration equations (Mandelbrot, 2005) were applied in resistivity, induction polarization, Pb and Zn datasets for achieving the nonlinear relationships in anomalous regions which were characterized by increasing in regression coefficients with more spatial correlation of the variable than linear statistics (Mehrnia, 2013).

### Results and Discussion

This research showed that both linear and nonlinear statistics are able to estimate the spatial association of geochemical anomalies with geophysical variables. A meaningful increase in the regression coefficient was also revealed after measuring the self-similar peculiarities of concentration values on gridded plots (Salehi, 2004; Torkashvand et al., 2009). From the fractal point of view, Pb ore-minerals have been deposited in the western sub-region, while Zn mineralization seems to be extended in the depth

of eastern alterations. Also a predictable geochemical zonation can be considered in the western target (meaningful Pb anomalies) that is more patterned than the eastern halos according to geological observations (Momenzadeh and Ziseman, 1981) and mineralogical evidences (Salehi, 2004). An increase in Supra ore/Sub ore proportional content was measured in the western sub-region which indicated more reliable potential of Pb mineralization (Galena as a particular indication of sulfide-rich minerals) than the same phases of ore forming processes in the eastern sub-region, although the content of Pb-ores rapidly decreases in the eastern target and is replaced by Zn minerals (Sphalerite as particular indication of sulfide-rich mineralization). Because power law relationships are significant in both geochemical and geophysical anomalies (Mehrnia, 2013) a detailed program including borehole geophysics and litho-geochemical land-surveys should be considered in the prospected regions. Therefore, upcoming phases should emphasize on self-organized distribution of Pb-Zn anomalies to introduce a new set of nonlinear distributions in order to find the confidence regression coefficients between the variables. As the final results, fractal analysis of available databases represented new target areas with better mineralization aggregations than linear analysis of the anomalous regions according to micrographs. It means that surficial mineralization processes could be extended in depth and enriched next to altered host units because of a nonlinear but self-organized distribution of geochemical-geophysical anomalies in Tekieh ore deposit region.

## References

- Annells, R.N., Arthurton, R.S., Bazley, R.A.B., Davies, R.G., Hamed, M.A.R. and Rahimzadeh, F.R., 1985. Geological Map of Shazand- Khomein. Scale: 1:100000, Cartographic Department of Geological Survey of Iran.
- Calagari, A.A., 2010. Principles of geophysical explorations. University of Tabriz, Tabriz, 485 pp.
- Jafari, H., 2007. Using geoelectrical techniques for Zn-Pb explorations in Haft-Emarat district, Tekieh region (South East of Arak). Kimya Kavan Tosee Novin Company, Tehran, 206 pp.
- Mandelbrot, B., 2005. Fractal Geometry of Nature. W.H Freeman & Company, New York, 468 pp.
- Mehrnia, S.R., 2013. Application of fractal geometry for recognizing the pattern of textural zoning in epithermal deposits: (case study: Shikhdarabad Au-Cu indices East-Azerbaijan province). Journal of Economic Geology, 5(1): 23-36. (in Persian)
- Momenzadeh, M. and Ziseman, H., 1981. Lead – Zinc re mineralization potentials in Malayer – Esfahan district. Journal of Ore Deposit, 3(1): 88-101.
- Salehi, L., 2004. Geochemistry of REE content in Tekieh Pb-Zn ore deposit. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 181 pp.
- Torkashvand, S., Mehrnia, S.R. and Moghaddasi, S.J., 2009. Co-Processing of the geophysical parameters for Tekieh Zn-Pb ore deposits (south east of Arak). 4<sup>th</sup> PNU Geological National Conference, Payam Noor University of Mashhad, Mashhad, Iran.