

# بهره‌گیری از مدل‌های فرکتالی جهت جداسازی زون‌های پرعیار کانه‌زایی در کانسار طلای زرشوران، تکاب، شمال باختری ایران

قدرت‌اله رستمی پایدار\*

استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۷

## چکیده

کانسار طلای زرشوران در شمال باختر ایران در یک منطقه تاریخی معدنکاری طلا و آرسنیک در زون زمین‌ساختاری سنندج-سیرجان واقع شده است. این محدوده عمدتاً از سنگ‌های پرکامبرین تشکیل شده است. تزریق توده‌های گرانیتوئیدی الیگومیوسن در سازندهای پرکامبرین که سنگ درونگیر کانی‌سازی طلا هستند، باعث دگرسانی شدید، میلوئیتی شدن و کانه‌زایی طلا شده‌اند. هدف مطالعه حاضر، جداسازی زون‌های کانه‌زایی طلا با استفاده از تکنیک‌های فرکتالی عیار-تعداد (C-N) و عیار-حجم (C-V) بوده که بر اساس داده‌های ۴۴ گمانه حفاری و ۵۸۰۰ نمونه آنالیز شده انجام شده است. در ابتدا نمودار لگاریتمی طلا برای هر کدام از مدل‌های مذکور ترسیم شد. ۵ زون کانه‌زایی طلا با استفاده از مدل فرکتال عیار-تعداد و ۵ زون کانه‌زایی با بهره‌گیری از مدل فرکتال عیار-حجم مشخص شد که به ترتیب نشان‌دهنده شدت کانه‌زایی در سنگ دیواره، زون ضعیف، متوسط، بالا و زون بسیار غنی شده است. مدل‌های سه‌بعدی (۳D) زمین‌شناسی و فرکتالی به دست آمده نشان می‌دهد که زون‌های با کانه‌زایی پایین در اکثر نقاط کانسار رخ داده که اغلب مربوط به واحد سنگی ایمان‌خان است. علاوه بر این، بر اساس مدل‌های بررسی شده و محاسبه ماتریس میزان همپوشانی، مناطق با کانه‌زایی متوسط، بالا و زون غنی شده به ترتیب انطباق خوبی با واحد ژاسروئید، سنگ آهک چالداغ و واحد شیل زرشوران نشان می‌دهند.

**کلیدواژه‌ها:** مدل‌های فرکتال، زون کانه‌زایی، طلا، زرشوران، تکاب.

\*نویسنده مسئول: قدرت‌اله رستمی پایدار

E-mail: rostamigsi2006@gmail.com

## ۱- پیش‌نوشتار

کانسار طلای زرشوران در شمال باختری ایران و در ۴۹ کیلومتری شمال شهرستان تکاب و ۸ کیلومتری شمال خاوری روستای زرشوران واقع شده است (شکل ۱). طبقه‌بندی و جداسازی زون‌های همراه با کانه‌زایی از سنگ دیواره در زمین‌شناسی اقتصادی، اکتشافات زمین‌شیمیایی و در امر بهره‌برداری معادن از اهمیت فراوانی برخوردار است. به دلیل اینکه ساختار و ویژگی‌های هر کانسار در همیافتی کانیایی آن کانسار انعکاس داده می‌شود. بررسی‌های کانه‌نگاری و سکانس‌های پارازنتیکی حاوی اطلاعات بسیار مهمی از فرایندهای کانه‌زایی در کانسارها هستند (Cox and Singer, 1986). تشخیص نادرست سنگ میزان که کانه‌زایی در آن رخ داده است و همچنین تعیین میزان عیار موجود در زون‌های همراه با کانی‌سازی طلا می‌تواند منجر به اشتباهات جبران‌ناپذیری در طراحی و بهره‌برداری از این کانسارها شود. از این رو ارائه روشی نوین، که موجب بالارفتن دقت و بهبود نتایج شود، از مسائل قابل توجه متخصصین و پژوهشگران در بخش معدن و زمین‌شناسی است (Afzal et al., 2010). جدایش کانسنگ‌های کم‌عیار و پرعیار از یکدیگر بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، زمین‌شیمی، سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری صورت می‌پذیرد. در دو دهه اخیر، مدل‌های فرکتالی به‌طور گسترده‌ای در علوم زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به‌خصوص در اکتشافات زمین‌شیمی و زمین‌شناسی اقتصادی مطالعات بسیار گسترده‌ای در جهت جداسازی مقدار زمینه از آنومالی، شکل هندسی آنومالی‌ها، توزیع فضایی داده‌ها، ساختار کانه‌زایی در کانسار و ارزیابی ذخیره صورت گرفته است. مطالعه به کمک این روش‌ها مستلزم تجزیه و دقت بالایی است که در غیر این صورت، موجب تشخیص نادرست در مورد کانی‌سازی و عیار طلای موجود در کانسنگ خواهد شد (Foster and Jafarzadeh, 1994; Sadeghi et al., 2012; Afzal et al., 2013). هدف اصلی این مقاله تفکیک و جداسازی کانسنگ پرعیار و کم‌عیار در کانسار طلای زرشوران بر مبنای روش‌های فرکتالی عیار-تعداد و عیار-حجم است. مزیت دو روش فرکتالی عیار-تعداد و عیار-حجم بر سایر روش‌های سنتی و کلاسیک، توجه به هندسه فرکتالی در توزیع عیار در کانسار است و نیز در نظر گرفتن عیار عنصر اصلی و حجم کانسنگ دربرگیرنده آن است که می‌تواند در جدایش زون‌های پرعیار از سایر زون‌ها راهگشا باشد (Agterberg et al., 1996; Bai et al., 2010; Wang et al., 2010; Cheng and Li, 2002; Afzal et al., 2010, 2011, 2013, 2015 and 2016). لازم به ذکر است که تحلیل داده‌های زمین‌شیمیایی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های آمار کلاسیک نیز انجام شده است (Nazarpour et al., 2014) و نتایج پژوهش حاضر در راستای

## ۲- مواد و روش‌ها

بهبودسازی روش‌های تحلیل داده‌های اکتشافی منطقه کاربرد دارد. جهت بررسی تغییرات عیار، از ۴۴ حلقه گمانه اکتشافی به مترای کلی ۹۵۳۰ متر که تا اسفند ۱۳۹۱ با زوایای مختلف نسبت به افق در محدوده معدن حفر شده، استفاده شده است (شکل ۲). عمق این گمانه‌ها از ۲۵ تا ۳۲۴ متر متغیر است. در کانسارهای بزرگ و گسترده بایستی تأثیر توپوگرافی زمین نیز اعمال شود، زیرا شکل سه‌بعدی بخش‌های مختلف کانسار، بدون توجه به پستی و بلندی‌های زمین تهیه شده و شکل هندسی و اندازه آن واقعی نخواهد بود. برای این منظور از مختصات ارتفاعی دهانه گمانه‌ها برای نشان دادن تأثیر توپوگرافی در مدل‌سازی استفاده شده است. در شکل ۲ موقعیت گمانه‌ها و در شکل ۳ تصویر سه‌بعدی گمانه‌ها و شبکه حفاری نشان داده شده است. تعداد ۵۸۰۰ نمونه عمقی از زون‌های مختلف کانه‌زایی با نمونه‌برداری فواصل یک تا سه متر برداشت شد و مورد آنالیز ۸ عنصری قرار گرفت. با توجه به اولویت در عملیات اکتشاف حاضر، تغییرات و توزیع عنصر طلا به منظور جداسازی زون‌های زمین‌شناسی-معدنی در محدوده کانسار زرشوران مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این مرحله پس از ورود داده‌های گمانه‌های اکتشافی به نرم‌افزار Rockwork 15 و اعمال پردازش‌های عددی، زون‌های کانه‌زایی مختلف در این کانسار مورد شناسایی قرار گرفته و داده‌های حاصل از مدل‌های فرکتالی عیار-تعداد و عیار-حجم با زون‌های پرعیار حاصل از لاگینگ زمین‌شناسی مغزه‌های حفاری مقایسه شده است. در نهایت ماتریس میزان همپوشانی (Overall accuracy) بین مدل زمین‌شناسی و مدل‌های فرکتالی محاسبه شد و در نهایت مدل فرکتالی که دارای همپوشانی بیشتری است جهت زون‌بندی صحیح شدت کانه‌زایی ارائه شد. در گام بعدی ابعاد بلوک‌های پروژه بر اساس داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی ۱۰×۲۵×۲۵ در نظر گرفته شده است. پس از آن اندازه ریزبلوک‌ها نیز برابر با ابعاد بلوک در نظر گرفته شدند.

## ۲-۱. مدل فرکتالی عیار-تعداد

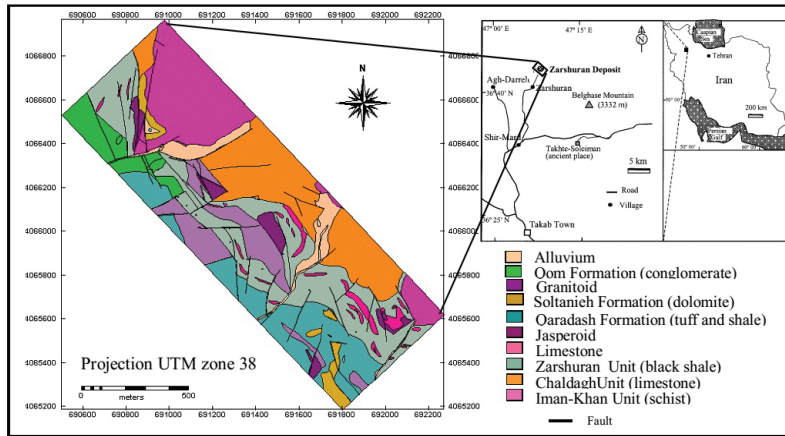
این روش توسط Mandelbrot (1983) و Agterberg et al. (1996) جهت تعیین مقدار زمینه و آنومالی‌های زمین‌شیمیایی ارائه شد و به عنوان یکی از انواع مدل‌های فرکتالی N-S است. روش N-S در مورد دسته‌بندی پدیده‌های طبیعی و برای توصیف توزیع جوامع زمین‌شیمیایی بدون برآورد اولیه داده‌ها به کار برده می‌شود. اساس این روش بر مبنای رابطه معکوس بین عیار

همچنین  $N(\geq C)$  هم برابر با تعداد نمونه‌های جمع‌آوری شده با مقادیر عیار بزرگ‌تر یا مساوی مقدار  $C$  است.  $p$  برابر با عیار و  $B$  هم توان مقیاسی و یا همان بُعد فرکتالی توزیع عناصر کانی‌ساز است. مزیت این روش در این است که قبل از برآورد و با داده‌های خام و اصیل اکتشافی محاسبات را انجام می‌دهد. به عبارت دیگر در این روش داده‌ها نیاز به پردازش و برآورد ندارند (Cheng et al., 1997).

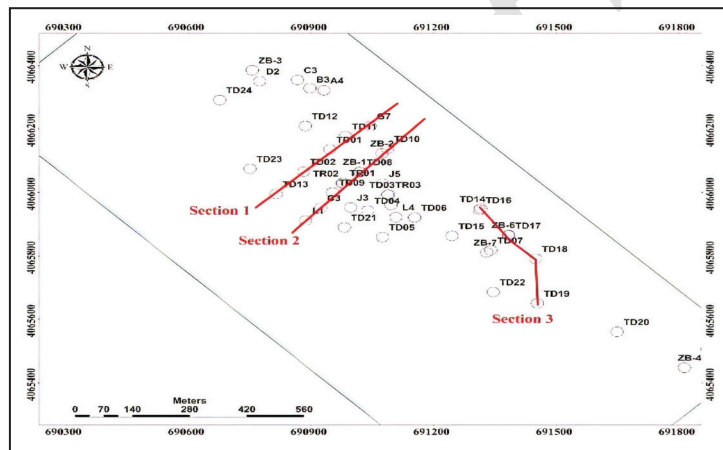
و فراوانی تجمعی هر عیار و عیارهای بالاتر از آن است. این مدل، توسط رابطه ۱ در ادامه بیان می‌شود (Mandelbrot, 1983; Sadeghi et al., 2012):

$$N(\geq C) \propto p^{-B} \quad (1)$$

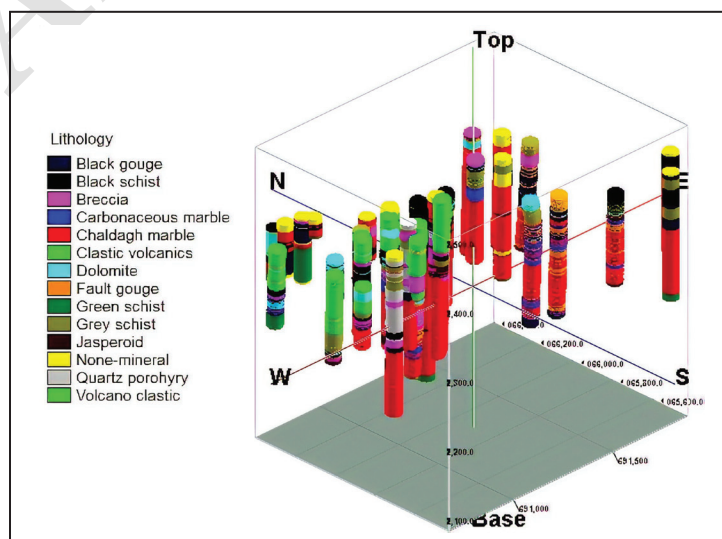
که در رابطه بالا،  $C$  و  $N$  به ترتیب بیانگر غلظت و فراوانی عیار عنصر مورد نظر هستند.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت کانسار طلای زرشوران، شمال باختری ایران (برگرفته از Asadi, 2000 با تغییرات).



شکل ۲- نمایی از موقعیت گمانه‌های اکتشافی در محدوده معدن طلای زرشوران.



شکل ۳- نمای سه‌بعدی شبکه حفاری و گمانه‌های موجود در کانسار طلای زرشوران.

## ۲-۲. مدل فرکتالی عیار-حجم

اساس روش عیار-حجم، بر این حقیقت استوار است که با افزایش عیار، حجم دربرگیرنده آن و عیارهای بالاتر، کمتر می‌شود؛ یعنی به عبارتی عیار و حجم با هم رابطه معکوس دارند (Mandelbrot, 1983; Sadeghi et al., 2012). این روش از سال ۲۰۱۱ در مورد تعدادی از کانسارهای ایران ارائه شد و مورد استفاده قرار گرفت (Afzal et al., 2011, 2013, 2015 and 2016). اساس این روش تابع رابطه بین ابعاد یک سلول دو بُعدی یا ریزبلوک (آلمان) سه بُعدی را با تعداد آنها و نیز متغیر اندازه‌گیری شده در آن بیان می‌کند. با کمک این تابع، در حالتی که مطالعه در سه بُعد صورت می‌گیرد و با ریزبلوک‌ها سر و کار دارد، می‌توان به رابطه ذیل رسید:

$$V(\geq \rho) \propto \rho^{-D} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $V$  حجم در برگیرنده عیارهای بزرگ‌تر و برابر با  $\rho$  در کانسار مورد مطالعه است؛ همچنین،  $D$  بیانگر بُعد فرکتالی است. به عبارت دیگر، چون حجم تابعی از سطح است، می‌توان از روند کلی اثبات رابطه عیار-مساحت، برای اثبات روش عیار-حجم استفاده کرد (Cheng et al., 1994). مدل فرکتالی C-V را نیز می‌توان طبق رابطه ذیل بیان کرد (Afzal et al., 2013; Sadeghi et al., 2012):

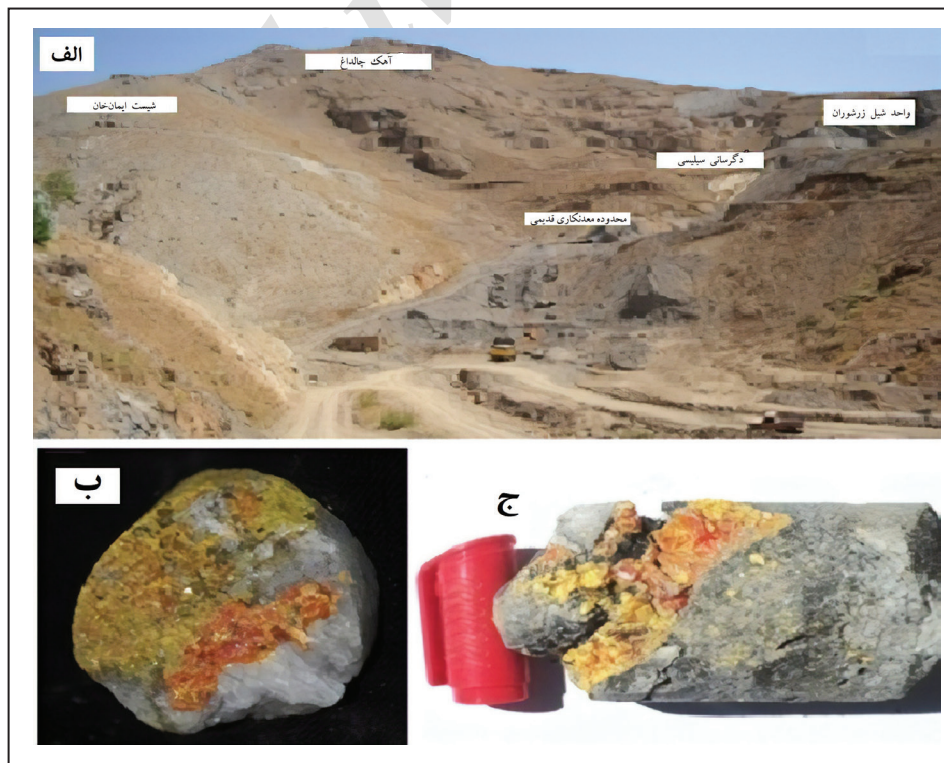
$$V(\rho \leq v) \propto \rho^{-a_1} ; V(\rho \geq v) \propto \rho^{-a_2} \quad (3)$$

که در آن،  $V(\rho \leq v)$  و  $V(\rho \geq v)$  دو حجم با عیارهای کمتر و بیشتر از مقدار عیار کانتور  $\rho$  را نشان می‌دهند.  $v$  هم بیانگر مقدار آستانه یک زون یا حجم است.  $a_1$  و  $a_2$  هم توان‌های توصیف‌کننده هستند.

## ۳-زمین‌شناسی منطقه

این منطقه از نظر تقسیمات ساختمانی زمین‌شناسی در زون سنندج-سیرجان قرار می‌گیرد. پی‌سنگ منطقه شامل دو مجموعه از سنگ‌های دگرگونی است، که مجموعه ایمان‌خان با ترکیب آمفیبول-اپیدوت‌شیت، سرپانتینیت‌شیت، سرسیت‌کلریت‌شیت،

کوارتز میکاشیت و کالک‌شیت در بخش زیرین و مجموعه چالداغ با ترکیب مرمر و کالک‌شیت در بخش فوقانی آن قرار دارند. این مجموعه دگرگونی ویژگی‌های رخساره شیت سبز را نشان می‌دهد (Samimi, 1992). واحد سنگی زرشوران شامل نهشته‌های آهک نازک‌لایه، دولومیت، شیل و میکاشیت‌های سیاه رنگ است که روی واحدهای قدیمی قرار گرفته‌اند و سنگ میزبان اصلی کانسار را تشکیل می‌دهند (شکل‌های ۴- A تا C). توف و ربولیت‌های اسیدی قره‌داش که هم‌ارز خروجی گرانیته دوران محسوب می‌شوند، روی واحد زرشوران قرار می‌گیرند (Karimi, 1993). در بخش باختری منطقه واحدهای دولومیتی معادل با سلطانیه، شیل و دولومیت معادل با سازند باروت و زاگون و ماسه‌سنگ لالون به‌طور همشیب روی واحد ربولیتی قره‌داش قرار گرفته‌اند. پس از نبود ته‌نشینی طولانی از اردوسین تا الیگوسن، پشروی دریای الیگومیوسن موجب ته‌نشست کنگلومرای بنفش، شیل میکادار و ماسه‌سنگ‌های آهکی الیگومیوسن (معادل سازند قم) شده است (Mehrabi et al., 1999). نهشته‌های آواری معادل با سازند سرخ فوقانی متشکل از تناوب‌های ماسه‌سنگ آهکی سرخ، رس، مارن و میکرو کنگلومرا، جدیدترین واحد رسوبی دریایی منطقه را تشکیل می‌دهند و گدازه‌های آتشفشانی جوان از جنس آندزیت تا تراکی آندزیت با شیب ملایمی روی سازند سرخ فوقانی قرار می‌گیرند. نهشته‌های چشمه‌های آب گرم از نوع تراورتن در برخی از مناطق رخنمون‌هایی را تشکیل داده‌اند که نشانگر فعالیت گرمایی در منطقه است. در کانسنگ طلای زرشوران مجموع ذخایر طلا با در نظر گرفتن عیار حد حدود ۰/۳ گرم بر تن در کلاس‌های مختلف حدود ۲۳ میلیون تن با عیار متوسط ۴/۲۴ گرم بر تن است که شامل ۹۸ تن طلا است. بر اساس مطالعات انجام شده کانی‌سازی طلا در کانسار زرشوران از جهاتی مشابه کانسار اپی‌ترمال پراکنده در سنگ‌های رسوبی و به‌ویژه در کربنات‌ها یعنی تیپ کارلین است (Asadi et al., 2000). نوع کانسنگ اقتصادی در زرشوران شناسایی شده است که بر اساس موقعیت و نحوه قرارگیری به دو دسته کم‌شیب شامل برش‌ها و تکنونیت‌های کانه‌دار و آهک پودری چالداغ (مرمر ماسه‌ای) و پرشیب شامل گوژ سیاه گسلی حاوی اورپیمنت، ژاسپر و تید و رآلگار هستند (شکل‌های ۴- A تا C).

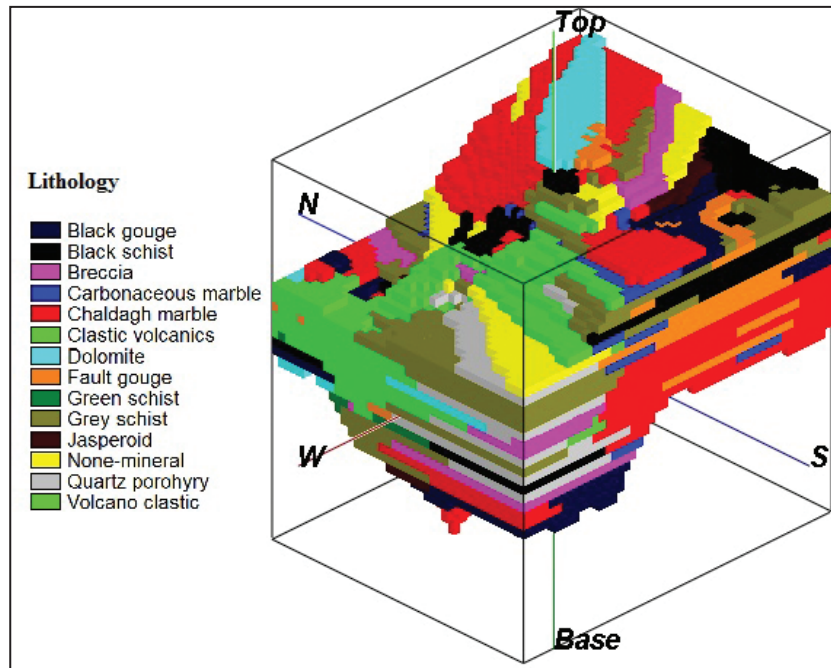


شکل ۴- الف) نمای کلی از محدوده کانسار طلای زرشوران شامل واحدهای شیت ایمان‌خان، آهک چالداغ و زرشوران و دگرسانی سیلیسی؛ ب) نمونه مغزه حفاری از آهک سیلیسی شده چالداغ با رگه‌های رآلگار و ارپیمنت؛ پ) نمونه مغزه حفاری از واحد زرشوران با رگه رآلگار و ارپیمنت.

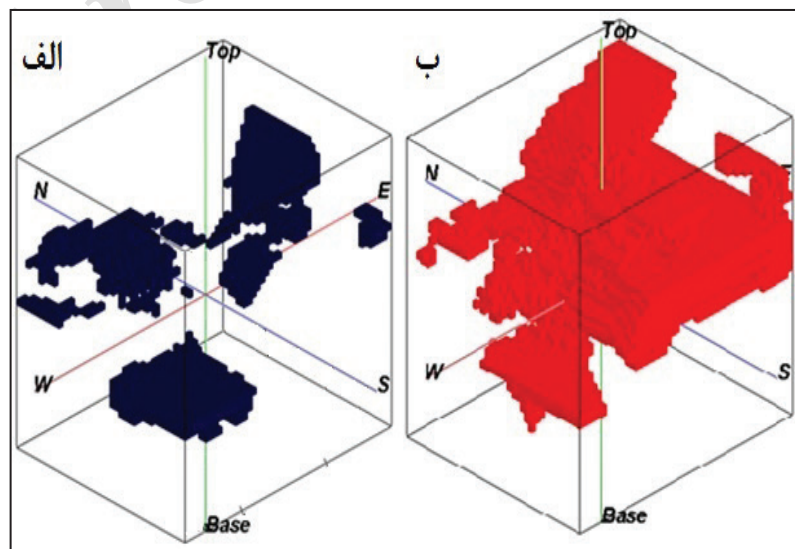
#### ۴- مدل‌سازی زمین‌شناسی کانسار

سیاه زرشوران، آهک سیلیسی چالداغ و ژاسپرویدها هستند (شکل ۵). دیگر واحدهای زمین‌شناسی که دارای کمترین کانه‌زایی هستند و در مدل‌سازی زمین‌شناسی به عنوان بخش فاقد کانه‌زایی در نظر گرفته می‌شوند، شامل شیست‌های ایمان‌خان، بخش کوارتز پورفیری و بخش برشی شده هستند. بنابراین در مدل‌سازی زمین‌شناسی، واحد شیل زرشوران به عنوان بخش همراه با کانه‌زایی غنی شده، آهک چالداغ به عنوان بخش همراه با عیار بالا (شکل‌های ۶- A و B) و شیست‌های ایمان‌خان به عنوان بخش فاقد کانه‌زایی در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی زمین‌شناسی کانسارها نقش بسیار مهمی در ارزیابی منابع و ذخایر و ایجاد فضای مناسب تخمین جهت بررسی‌های زمین‌آماری ایفا می‌کنند. به خصوص در مورد کانسارهای طلا، که تغییرات عیار در حد بسیار ناچیز هم می‌تواند قابل توجه باشد، از اهمیت به سزایی برخوردار هستند (Carranza, 2011). مدل‌سازی کانسارها شامل ساخت و تفکیک مدل واحدهای حاوی کانی‌سازی، تهیه مدل سنگ‌شناسی آنها و در نهایت ارائه مدل کلی زون‌های کانه‌زایی بر اساس داده‌های حاصل از عملیات اکتشافی است. بر اساس داده‌های حاصل از گمانه‌ها مهم‌ترین واحدهای موجود و مؤثر در فرایند کانه‌زایی شامل واحد شیل



شکل ۵- مدل زمین‌شناسی کانسار طلای زرشوران همراه با تأثیر توپوگرافی.



شکل ۶- مدل سه‌بعدی بخش غنی شده بر اساس لاگینک زمین‌شناسی در کانسار زرشوران: الف) شیل زرشوران؛ ب) آهک چالداغ.

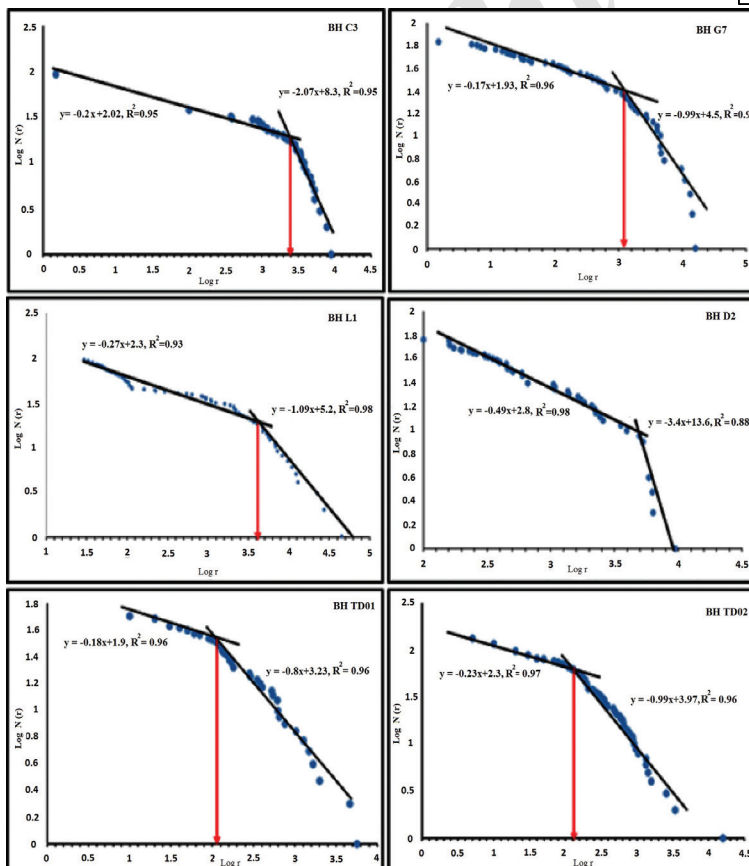
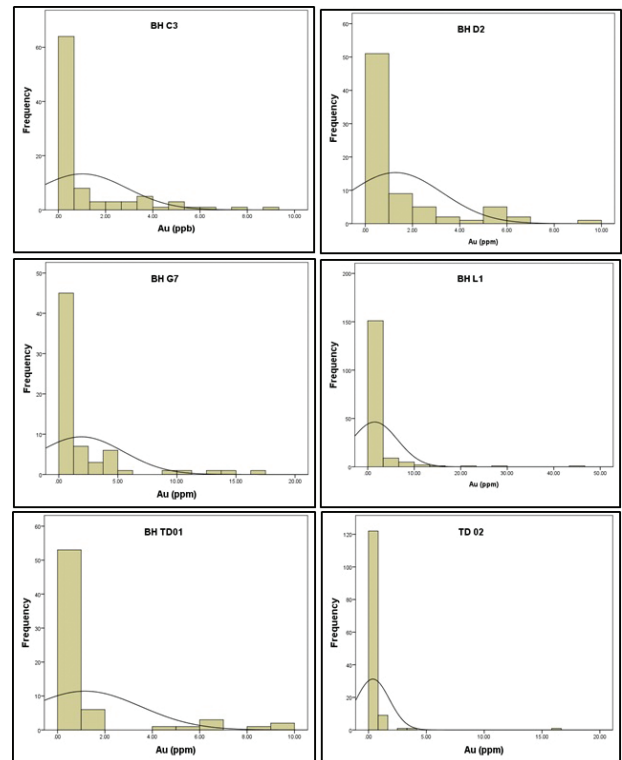


## ۵- توزیع فراوانی عیار طلا

نشان می‌دهند. از طرف دیگر، گمانه‌هایی مانند BHZ11 و TD12، دارای میانگین عیار قابل ملاحظه‌ای هستند و رفتار مونوفرنکتال از خود نشان می‌دهند. بنابراین خاصیت فرکتال دوگانه اکثر گمانه‌های در کانسار زرشوران نشان از چندین مرحله کانه‌زایی در این کانسار دارد. ضریب تغییرات (CV) که حاصل انحراف استاندارد تقسیم بر مقدار میانگین است، نشان‌دهنده درجه تغییرات عیار طلاست. همچنین در مواردی که ضریب تغییرات و ضریب واریانس به یکدیگر نزدیک باشند، نشان‌دهنده تغییرات اندک و آرام عیار طلا در طول گمانه است (Wang et al., 2010).

در جدول ۱ بر اساس مجموعه داده‌های مربوط به گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرشوران مقادیر میانگین، انحراف استاندارد، ضریب واریانس عیار طلا بر حسب ppm ارائه شده‌اند. همچنین هیستوگرام توزیع عیار طلا در برخی از گمانه‌ها در شکل ۷ آورده شده است. نمودارهای لگاریتمی مقدار فراوانی تجمعی در مقابل عیار طلا، نشان‌دهنده رفتار فرکتال دوگانه توزیع طلا در اکثر گمانه‌ها و همچنین رفتار مونوفرنکتال در برخی از گمانه‌هاست (شکل ۸ و جدول ۱). لازم به ذکر است، برخی گمانه‌ها که دارای مقدار میانگین عیار پایینی هستند، مانند TD13 و TD18، رفتار فرکتالی دوگانه از خود

شکل ۷- هیستوگرام عیار طلا بر حسب ppm در برخی از گمانه‌های اکتشافی کانسار زرشوران.



شکل ۸- نمودار لگاریتمی فراوانی تجمعی در مقابل عیار طلا در برخی از گمانه‌ها (در گمانه‌های ردیف‌های نخست و آخر رفتارهای مولتی فرکتال به‌وضوح دیده می‌شوند).

جدول ۱- نتایج آمار توصیفی گمانه‌های اکتشافی در کانسار طلای زرشوران.

شماره گمانه	تعداد نمونه	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف استاندارد	ضرب تغییرات
A4	۴۰	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰/۱	۰	۰
B3	۲۹	۰/۰۱۵	۸/۹۵	۱/۲۷	۱/۹۶	۴
BHZ11	۹	۰/۰۱۵	۱۳/۵۶	۳/۰۴	۴/۳۷	۱۹/۱۱
C3	۹۴	۰/۰۰۱۵	۹/۰۵	۱/۰۲	۱/۸۸	۳/۵۴
D2	۷۶	۰/۰۰۱۵	۹/۵	۱/۲۸	۱/۹۸	۳/۹۲
G7	۶۷	۰/۰۰۱۵۰	۱۶/۳۰	۱/۹	۳/۵۷	۱۲/۷۶
L1	۱۷۱	۰/۰۰۱۵	۴۵/۷۲	۱/۴۸	۴/۹۱	۲۴/۰۸
J3	۱۷۵	۰/۰۰۱۵	۱۳۴۸	۱/۸۳	۱/۷۷	۳/۱۶
J5	۱۳۵	۰/۰۱	۵۵/۱۸	۱/۸۱	۴۵۷	۲۹/۷
L4	۲۵۶	۰/۰۱۵	۱۱۰	۱/۸۷	۲/۳۱	۵/۳۴
TD01	۶۷	۰/۰۱	۹/۶۸	۱/۱۷	۲/۳۴	۵/۴۷
TD02	۱۳۴	۰/۰۰۵	۱۵/۸۸	۰/۳۷	۱/۴۳	۲/۰۴
TD03	۱۷۴	۰/۰۰۵	۳۳/۷۶	۲/۱۲	۴/۷	۲۲/۰۶
TD04	۱۸۹	۰/۰۰۵	۴۸/۶۴	۲/۹۸	۵/۱۵	۲۶/۴۹
TD05	۲۱۹	۰/۰۰۵	۳۱/۳۶	۱/۵۸	۴/۰۳	۱۶/۲۶
TD06	۱۶۶	۰/۰۰۵	۳۵/۳۲	۱/۸۹	۴/۷۵	۲۲/۵۳
TD07	۲۰۹	۰/۰۰۵	۸۵/۵	۰/۸۶	۶/۰۷	۳۶/۸۸
TD08	۱۴۵	۰/۰۰۵	۱۲/۸۸	۰/۶۸	۱/۴۳	۲/۰۳
TD09	۱۶۸	۰/۰۰۵	۷۳/۷۵	۲/۸۶	۷/۱۸	۵۱/۵۲
TD10	۹۲	۰/۰۰۵	۱۰۰	۳/۵۵	۱۰/۸۳	۱۱۷/۲۶
TD11	۸۳	۰/۰۰۵	۱۱۶/۲۵	۹/۴۲	۲۲/۹۲	۵۲۵/۲
TD12	۷۲	۰/۰۰۵	۲۹/۶	۱/۲۳	۴/۹۹	۲۴/۹۴
TD13	۷۰	۰/۰۰۵	۳/۸۷	۰/۳۱	۰/۷۳	۰/۵۳
TD14	۶۴	۰/۰۰۵	۲۶	۲/۳	۵/۳۶	۲۶/۶۹
TD15	۱۷۵	۰/۰۰۵	۲۰/۴۹	۰/۳۴	۱/۷۵	۳/۰۵
TD16	۱۷۱	۰/۰۰۱۵	۴۱/۲۸	۰/۸۹	۴/۶۶	۲۱/۷
TD17	۱۹۴	۰/۰۰۱۵	۱۸/۴	۰/۴۲	۱/۴۷	۲/۱۷
TD18	۲۰۳	۰/۰۰۱۵	۱۲/۲۶	۰/۳۲	۰/۹۸	۰/۹۶
TD19	۲۰۵	۰/۰۰۱۵	۵۹/۲۹	۱/۰۴	۵/۳۶	۲۸/۷۷
TD20	۱۵۴	۰/۰۰۱۵	۲۷/۰۵	۰/۸۳	۲/۷۸	۷/۷۲
TD21	۲۰۵	۰/۰۰۱۵	۳۶/۹۴	۰/۴۳	۲/۷۲	۷/۴
TD22	۲۳۲	۰/۰۰۱۵	۴۲/۴۴	۱/۱	۳/۶۷	۱۳/۵
TD23	۹۲	۰/۰۰۱۵	۱۲/۰۸	۰/۵	۱/۹۳	۳/۷۲
TD24	۱۰۷	۰/۰۰۱۵	۰/۹	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۰۱
TR02	۶۸	۰/۰۰۵	۰/۲۹	۰/۰۳	۰/۰۵	۰۰۰
TR03	۷۰	۰/۰۰۵	۲۲/۲۶	۴/۰۱	۴/۸۸	۲۳/۸
ZB1	۱۱۵	۰/۰۰۵	۷۰/۳۰	۱/۳۷	۶/۸۶	۴۷/۰۴
ZB2	۱۳۴	۰/۰۱	۷۰/۲۶	۵/۱۶	۷/۸۷	۶۱/۹
ZB3	۷۸	۰/۰۱	۱۰/۱۳	۰/۹۳	۱/۷۲	۲/۹۶
ZB4	۱۶۵	۰/۰۱	۳/۵۲	۰/۱۹	۰/۳۸	۰/۱۴
ZB5	۹۴	۰/۰۱	۴/۳	۰/۵۱	۰/۷۸	۰/۶
ZB6	۱۰۶	۰/۰۱	۲۸/۴	۰/۴۸	۲/۸۴	۸/۰۹
ZB7	۱۲۳	۰/۰۱	۵۹/۶	۱/۰۱	۶/۰۶	۳۶/۷۳

## ۶- جدایش زون‌های کانه‌زایی با استفاده از روش‌های فرکتالی

عیار- تعداد نیز چندین جمعیت زمین‌شیمیایی وجود داشته باشد. نمودار لگاریتمی عیار- تعداد برای عنصر طلا در گمانه‌های اکتشافی کانسار زرشوران ترسیم و شکستگی‌ها و تغییر شیب در خط برازش شده به نقاط مشخص شد که نشانگر تغییر جوامع زمین‌شیمیایی است (شکل ۹). منحنی عیار- تعداد رسم شده برای این کانسار ۵ نقطه شکست و ۶ جامعه آماری مجزا را در شکل ۹ نشان می‌دهد. همچنین این منحنی یک ساختار چند فرکتالی را نشان می‌دهد که زون‌های کانی‌زایی با بُعد فرکتالی بیشتر قابل مشاهده هستند. نقاط شکست موجود در منحنی به ترتیب منطبق بر عیارهای ۱۵۸/۴، ۱۱۲۲، ۶۳۰۹/۵، ۶۳۰۹۵/۷ ppb هستند (جدول ۲).

در نقطه ما قبل آخر، که خطی با شیب تند و بُعد فرکتالی بالاتر برازش شده است، پرعیارترین و غنی‌ترین جامعه آماری طلا قرار گرفته که در ارتباط با واحد شیل سیاه زرشوران است (شکل ۱۰-ث). بخش مابین عیارهای ۶۳۰۹/۵ تا ۱۱۲۲ ppb را می‌توان از نظر عیار طلا جامعه‌ای با عیار بالا در نظر گرفت که مربوط به آهک‌های سیلیسی شده چالداغ است. تغییرات عیارهای بین ۱۵۸/۴ تا ۱۱۲۲ ppb نشانگر جامعه‌ای با عیار متوسط است که نشان‌دهنده کانه‌زایی با عیار متوسط در واحدهای ژاسپروید هستند. در نهایت جامعه آخر که شیبی برابر با خط افق و بُعد فرکتالی پایینی دارد را می‌توان به عنوان سنگ دیواره و زون بدون کانی‌سازی در نظر گرفت که مربوط به واحدهای شیست ایمان‌خان، بخش کوارتز پورفیری و واحدهای ولکانوکلاستیک است. با تأملی مختصر در منحنی لگاریتمی عیار- تعداد می‌توان به این نکته پی‌برد که متناسب با بالا رفتن عیار طلا، بُعد فرکتالی عیار در مقابل تعداد کاهش پیدا می‌کند که این نکته اساس و پایه روش فرکتالی عیار- تعداد برای تفکیک جوامع زمین‌شیمیایی است. به نحوی که با افزایش بُعد فرکتالی، فراوانی عیار و تعداد ریزیلوک‌ها کاهش می‌یابد و این نشان‌دهنده کوچک و کم بودن منطقه پرعیار در منطقه مورد مطالعه است و انطباق خوبی با مدل‌های سه بُعدی پراکندگی عیار طلا در کانسار زرشوران دارد (شکل‌های ۱۰-الف تا ث).

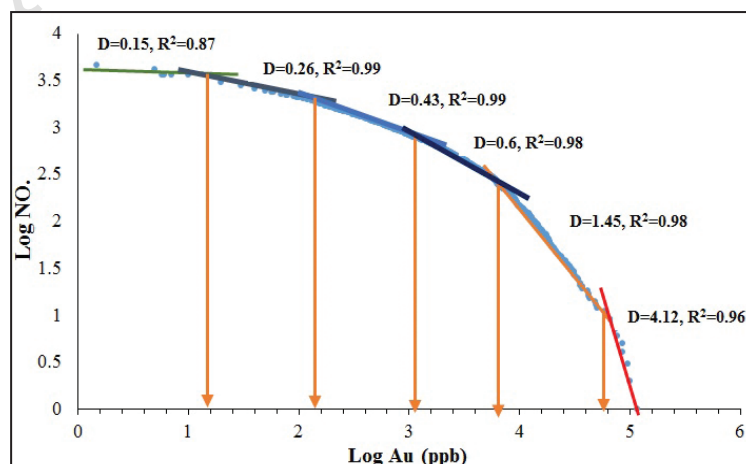
برای ساخت مدل توزیع عیار از روش وزن‌دهی بر اساس عکس فاصله (IDW) استفاده شده است. در این روش برای تعیین ارزش هر سلول و یا نقطه نامعلوم (نمونه‌برداری نشده) از ارزش‌های نقاط نمونه‌برداری شده مجاور استفاده و با گرفتن میانگین از آنها، ارزش نقطه مجهول برآورد می‌شود. هر چقدر نقاط نمونه‌برداری شده به مرکز نقطه‌ای که قرار است ارزش آن برآورد شود، نزدیک‌تر باشد آن نقطه با وزن بیشتری در محاسبه میانگین وزنی ارزش نقاط نمونه‌برداری شده مجاور شرکت خواهد کرد. در حقیقت وزن آن متأثر از عکس فاصله است. روش‌های زمین‌شناسی سنتی به خصوص بر اساس لاگینگ مغزه‌های حفاری پاسخگوی تفکیک زون‌های همراه با کانه‌زایی نیستند. امروزه روش‌های ریاضی به خصوص روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتالی از مهم‌ترین روش‌ها برای این کار هستند. از مهم‌ترین این روش‌ها، مدل‌های عیار- تعداد و عیار- حجم هستند که توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Afzal et al., 2010 and 2011; Sadeghi et al., 2012).

### ۶-۱. جداسازی زون‌های کانه‌زایی با استفاده از روش عیار- تعداد

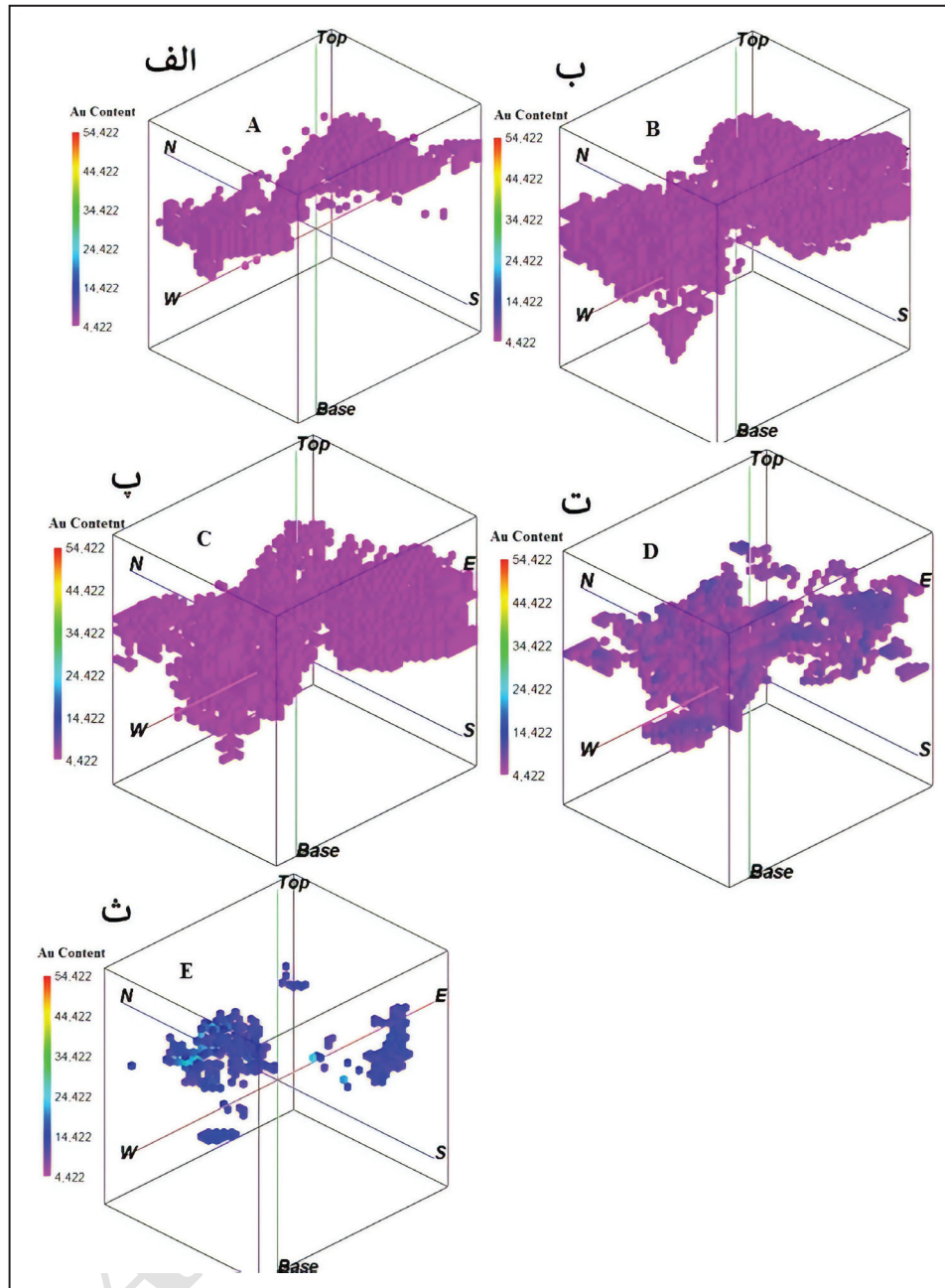
در این مرحله با استفاده از روش عیار- تعداد، جوامع گوناگون و در حقیقت زون‌های مختلف کانه‌زایی در کانسار زرشوران از یکدیگر تفکیک می‌شوند. روش‌های فرکتالی می‌توانند روابط بین نتایج به دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و کانی‌شناسی را توضیح دهند و نمودارهای لگاریتمی حاصل از روش فرکتال عیار- تعداد، بیانگر تغییرات و تفاوت‌های زمین‌شناختی هستند. نقاط شکست بین خطوط برازش شده بر روی نمودار لگاریتمی و مقادیر متناظر عیار عنصر، به عنوان حدود آستانه‌ای، برای جداسازی زون‌های زمین‌شیمیایی در میان مؤلفه‌های گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرند که بیان‌کننده عوامل مختلفی از جمله تفاوت‌های سنگ‌شناسی و فرایندهای زمین‌شیمیایی هستند (Lima et al., 2003). مطالعات حاصل از روش‌های فرکتالی ضریب هورست و توان- قانون و همچنین روش شمارش مربعات نشان‌دهنده عدم توزیع نرمال طلا و چندین جمعیت زمین‌شیمیایی و زمین‌شناختی در کانسار زرشوران هستند (Omran et al., 2014). بنابراین انتظار می‌رود که در روش مدل‌سازی

جدول ۲- جوامع عیاری جدا شده برای عنصر طلا بر اساس روش عیار- تعداد در کانسار زرشوران.

Mineralized Zones	Threshold Au (ppb)	Range Au (ppb)
Wall rock	15.48	<15.48
Weakly	158.48	15.48-158.48
Moderately	1122	158.48-1122
Highly	6309.5	1122-6309.5
Enriched	63095.7	>6309.5



شکل ۹- منحنی لگاریتمی عیار- تعداد برای عنصر طلا در کانسار زرشوران.



شکل ۱۰- جداسازی زون‌های کانه‌زایی در کانسار طلای زرشوران بر اساس مدل‌سازی فرکتالی عیار- تعداد شامل: الف) زون سنگ دیواره (A); ب) زون ضعیف (B); پ) زون متوسط (C); ت) زون بالا (D); ث) زون غنی شده (E).

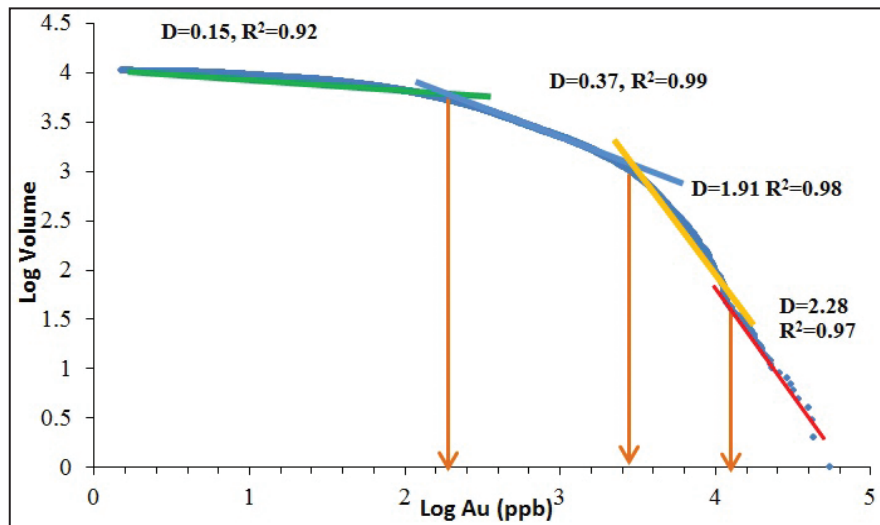
## ۶-۲. جداسازی زون‌های کانه‌زایی با استفاده از روش عیار- حجم

در این مرحله نیز مانند روش عیار- تعداد جوامع زمین‌شیمیایی و در حقیقت زون‌های گوناگون کانه‌زایی در کانسار زرشوران از یکدیگر تفکیک شده‌اند. مدل فرکتالی عیار- حجم نیز در مطالعات متعدد اکتشافات زمین‌شیمیایی ایران توسط محققین مختلف مورد توجه و بهره‌برداری قرار گرفته است (Afzal et al., 2010; Sadeghi et al., 2012). اساس این روش تغییرات عیار در برابر حجم در برگیرنده آن است که می‌تواند نمایانگر تغییرات شرایط زمین‌شناسی در هر زون باشد. با توجه به اینکه حجم هر ریزبلوک معلوم بوده، مقدار عیار طلا برای هر یک محاسبه و در نهایت منحنی لگاریتمی عیار- حجم برای عنصر طلا ترسیم شده است. منحنی لگاریتمی عیار- حجم به‌طور مشخص چهار جامعه زمین‌شیمیایی و سه نقطه شکست را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). نقاط شکست آستانه‌های زمین‌شیمی برای عنصر طلا به ترتیب بر عیارهای ۱۹۹/۵۲، ۲۶۳۰، ۱۲۵۸۹/۵ ppm منطبق هستند (جدول ۳).

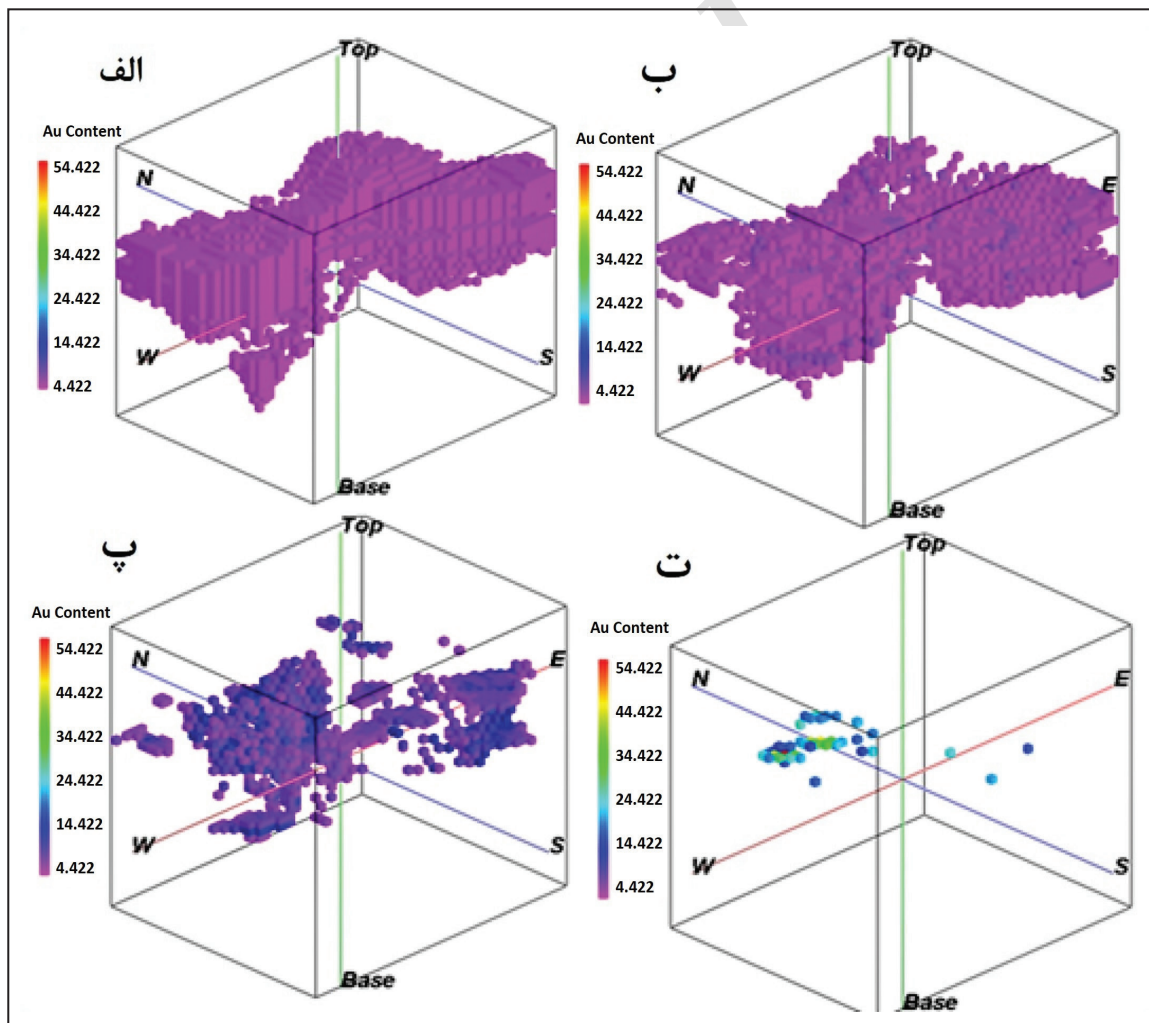
در نقطه آخر، که خطی با شیب تند و بُعد فرکتالی بالاتر برازش شده، پرعیارترین و غنی‌ترین جامعه آماری طلا قرار گرفته است. این جامعه در ارتباط با واحد شیل سیاه زرشوران

است. بخش مابین عیارهای ۲۶۳۰ تا ۱۲۵۸۹ ppb را می‌توان از نظر عیار طلا جامعه‌ای پرعیار در نظر گرفت که مربوط به آهک‌های سیلیسی شده چالداغ هستند. محدوده بین ۱۹/۵۲ تا ۲۶۳۰ را می‌توان به عنوان زون با عیار متوسط در نظر گرفت که در ارتباط با بخش ژاسپرویدی کانسار است. در نهایت می‌توان جامعه آخر را که شیبی نزدیک به خط افق و بُعد فرکتالی پایین دارد، به عنوان سنگ دیواره و مناطق بدون کانی‌سازی در نظر گرفت. این مناطق شامل شیبست ایمان‌خان، بخش کوارتز پورفیری و واحدهای ولکانوکلاستیک هستند. با تأملی مختصر در منحنی لگاریتمی عیار- حجم می‌توان به این نکته پی برد که متناسب با بالا رفتن عیار طلا، بُعد فرکتالی عیار در مقابل حجم کاهش پیدا می‌کند که این نکته اساس و پایه روش‌های زمین‌آماري از جمله روش فرکتالی عیار- حجم برای تفکیک جوامع زمین‌شیمیایی است. به عبارت دیگر با بالا رفتن عیار طلا از حجم کانسنگ کاسته می‌شود. این موضوع دارای انطباق خوبی با مدل‌های سه‌بُعدی پراکنده‌گی عیار طلا در کانسار زرشوران است (شکل‌های ۱۲- الف تا ت).





شکل ۱۱- منحنی لگاریتمی عیار- حجم برای عنصر طلا در کانسار زرشوران.



شکل ۱۲- جداسازی زون‌های کانه‌زایی در کانسار طلای زرشوران بر اساس مدل سازی فرکتالی عیار- حجم شامل: الف) زون ضعیف (A)؛ ب) زون متوسط (B)؛ پ) زون بالا (C)؛ ت) زون غنی شده (D).

## ۷- تشخیص واحد سنگی میزبان پرعیار طلا با استفاده از ماتریس میزان همپوشانی

مقایسه بین زون غنی شده به دست آمده از مدل‌سازی سه بُعدی زمین‌شناسی و زون غنی شده به دست آمده از مدل‌سازی فرکتالی نشان دادند که مدل فرکتال عیار-حجم داری انطباق بهتری است. بدین دلیل که تعداد ریز بلوک‌های همپوشانی شده (A) در مدل عیار-حجم (۲۵ ریز بلوک) بیشتر از مدل عیار-تعداد (صفر ریز بلوک) است. در این جدول میزان همپوشانی مدل فرکتالی عیار-حجم با مدل زمین‌شناسی ۰/۹۱ و همپوشانی مدل فرکتالی عیار-تعداد با مدل زمین‌شناسی ۰/۸۸ است که نشان‌دهنده این است که روش عیار-حجم نتایج بهتری برای شناسایی زون‌های کانه‌زایی در این کانسار ارائه می‌دهد (جدول ۵). مقایسه بین زون پرعیار مدل‌های فرکتالی و زون پرعیار در مدل زمین‌شناسی سه بُعدی نشان‌دهنده تشابه بین هر دو مدل است. میزان همپوشانی‌های مدل‌های عیار-حجم و عیار-تعداد به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۵۹ است (جدول ۶). همچنین میزان همپوشانی زون با عیار متوسط به دست آمده از مدل‌سازی عیار-حجم بیشتر از زون کانه‌زایی از مدل‌سازی عیار-تعداد است (جدول ۷).

با توجه به مدل کلی سنگ‌شناسی به دست آمده بخش اعظم کانه‌زایی مربوط به واحد شیلی زرشوران، آهک سیلیسی شده چالداغ و واحد ژاسپرویدی است. در این بخش سعی شده است که انطباق زون‌های به دست آمده از روش فرکتالی عیار حجم و عیار-تعداد و مشاهدات زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گیرد. در این زمینه Carranza (2011) جهت نشان دادن تحلیل همبستگی فضایی بین مدل‌های دوتایی زمین‌شناسی- فرکتالی از ماتریس میزان همپوشانی (Overall Accuracy) OA استفاده کرده است. در این راستا فرایند اشتراک بین نتایج به دست آمده از مدل‌های فرکتالی و زون‌های مدل زمین‌شناسی، جهت دست‌یابی به تعداد ریزبلوک‌های مربوط به هر کدام از زون‌های کانه‌زایی در جدول ۴ ارائه شده است. با استفاده از تعداد ریزبلوک‌های به دست آمده، خطای نوع یک (Type 1 Error) و خطای نوع دو (Type 2 Error) و همپوشانی مدل فرکتالی با توجه به زون‌های مختلف مدل زمین‌شناسی به دست آمده از داده‌های زمین‌شناسی برآورد شدند.

جدول ۳- جوع عیاری جدا شده برای عنصر طلا بر اساس روش عیار-حجم در کانسار زرشوران.

Mineralized Zones	Threshold Au (ppb)	Range Au (ppb)
Wall rock (barren host rock)	199.52	<199.52
Moderately	2630	199.52-2630
Highly	12589.5	2630-12589.5
Enriched	63095.7	>12589.5

جدول ۴- ماتریس همپوشانی که نشان‌دهنده نتایج مربوط به مدل فرکتالی و مدل زمین‌شناسی است. پارامترهای A، B، C و D نشان‌دهنده میزان واحدهای مشترک ما بین مدل زمین‌شناسی و مدل فرکتالی هستند (Carranza, 2011).

		Geological Model	
		Inside Zone	Outside Zone
Fractal model	Inside Zone	True Positive (A)	False Positive (B)
	Outside Zone	False Negative (C)	True Negative (D)
		Type 1 Error = C/(A+B)	Type 2 Error = (B/B+D)
		Overall Accuracy = (A+D)/(A+B+C+D)	

جدول ۵- میزان همپوشانی (OA)، بین نتایج به دست آمده از مدل فرکتالی عیار-تعداد و عیار-حجم داده‌های طلا و مدل سه بُعدی زمین‌شناسی در زون غنی شده برای واحد زرشوران.

		Enriched mineralized zone of geological model			
		Inside Zone		Outside Zone	
C-V Fractal model of Enriched mineralized zone	Inside Zone	A	25	B	17
	Outside Zone	C	844	D	9539
		Type I E	0.97	Type II E	0.001
		OA = 0.91			
		Extremely mineralized zone of geological model			
		Inside Zone		Outside Zone	
C-N Fractal model of Enriched mineralized zone	Inside Zone	A	0	B	309
	Outside Zone	C	869	D	9247
		Type I E	1	Type II E	0.03
		OA = 0.88			

جدول ۶- میزان همپوشانی (OA)، بین نتایج به دست آمده از مدل فرکتالی عیار- حجم و عیار- تعداد داده‌های طلا و مدل سه بعدی زمین‌شناسی در زون پر عیار برای آهک چالداغ.

		Highly mineralized zone of geological model			
		Inside Zone		Outside Zone	
C-V Fractal model of extremely mineralized zone	Inside Zone	A	523	B	535
	Outside Zone	C	3767	D	5600
		Typ1E	0.87	Type2E	0.08
		OA= 0.58			
		Highly mineralized zone of geological model			
		Inside Zone		Outside Zone	
C-N Fractal model of extremely mineralized zone	Inside Zone	A	928	B	866
	Outside Zone	C	3362	D	5269
		Typ1E	0.78	Type2E	0.14
		OA =0.59			

جدول ۷- میزان همپوشانی (OA)، بین نتایج به دست آمده از مدل فرکتالی عیار- حجم و عیار- تعداد داده‌های طلا و مدل سه بعدی زمین‌شناسی در زون با عیار متوسط برای واحد ژاسپروید.

		Moderate mineralized zone of geological model			
		Inside Zone		Outside Zone	
C-V Fractal model of Moderate mineralized zone	Inside Zone	A	2165	B	1110
	Outside Zone	C	3180	D	5025
		Typ1E	0.59	Type2E	0.18
		OA= 0.62			
		Moderate mineralized zone of geological model			
		Inside Zone		Outside Zone	
C-N Fractal model of Moderate mineralized zone	Inside Zone	A	1829	B	985
	Outside Zone	C	4256	D	5150
		Typ1E	0.69	Type2E	0.16
		OA= 0.57			

## ۸- نتیجه‌گیری

عیاری ۱۵۸/۴۸ تا ۱۱۲۲ ppb برای مدل عیار- تعداد و ۱۹/۵۲ تا ۲۶۳۰ ppb برای مدل عیار- حجم قرار دارد. تطبیق بین واحدهای سنگ‌شناسی و جوامع عیاری حاصل از محاسبات فرکتالی عیار - تعداد و عیار- حجم، با استفاده از ماتریس میزان همپوشانی، نشان‌دهنده ارتباط قوی مدل زمین‌شناسی واحدهای شیل زرشوران، آهک چالداغ و ژاسپرویدی با میزان کانه‌زایی طلا هستند. پس از تلفیق نتایج با گمانه‌های منطقه، بهترین افق کانی‌سازی در واحد زرشوران و سپس در واحد چالداغ قرار دارد و به سمت جنوب باختر به علت افزایش ضخامت زرشوران و فرسایش کمتر آن در اعماق، ضخامت زون کانی‌سازی بیشتر می‌شود. بدیهی است که نتایج حاصل از پژوهش حاضر در مورد کانساز زرشوران می‌تواند به عنوان یک الگو در ارزیابی ذخایر طلای نوع کارلین در محدوده تکاب و نیز در بخش‌های با زمین‌شناسی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

## سپاسگزاری

از مسئولین محترم معدن طلای زرشوران که داده‌های حفاری را در اختیار قرار دادند و امکان بازدید و برداشت‌های صحرایی را فراهم کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

در این پژوهش از دو مدل فرکتالی عیار- حجم و عیار- تعداد و مدل زمین‌شناسی حاصل از مغزه‌های حفاری به عنوان ابزاری ساده و مفید در جداسازی آنومالی‌های زمین‌شیمیایی از زمینه و زون‌های کانه‌زایی طلا در کانساز زرشوران استفاده شد. نتایج مدل‌سازی فرکتالی نشان‌دهنده پنج جامعه عیاری طلا در روش عیار- تعداد و چهار جامعه آماری در روش عیار- حجم است که با زون‌های دارای کانی‌سازی و گسل‌های موجود در منطقه بر اساس مدل زمین‌شناسی موجود مقایسه شدند. بر مبنای شدت کانه‌زایی، چهار زون طلا دار در محدوده کانساز زرشوران جداسازی شد به ترتیب با زون‌های غنی شده، بالا، متوسط، ضعیف و سنگ دیواره مشخص شده است. مقادیر آستانه زون غنی شده بر اساس مدل‌های فرکتالی عیار- تعداد و عیار- حجم به ترتیب ۶۳۰۹/۵ و ۱۲۵۸۹ ppb و شامل پهنه‌ای هستند که تنها در بخش کوچکی از محدوده شمال کانساز زرشوران مشاهده می‌شود و از نظر حجم ذخیره کوچک است. زون پرعیار با محدوده عیاری ۱۱۲۲ تا ۶۳۰۹/۵ ppb در مدل عیار- تعداد و ۲۶۳۰ تا ۱۲۵۸۹ ppb در مدل عیار- حجم، گسترش و حجم بیشتری نسبت به زون غنی شده نشان می‌دهد. همچنین نتایج سه بعدی زمین‌شناسی و مدل‌سازی‌های فرکتالی نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز حجمی کانساز در زون کانه‌زایی متوسط با دامنه

## کتابنگاری

رشیدنژاد عمران، ن.، رستمی‌بایدار، ق.، نظریور، ا. و محرایی‌نژاد، ع.، ۱۳۹۳ الگوی توزیع ژئوشیمیایی عمقی عیار طلا با استفاده از روش‌های فرکتالی به منظور پهنه‌بندی اهداف اکتشافی ناحیه‌ای در کانسار طلای زرشوران، تکاب، شمال‌باختر ایران، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۲، صص. ۵۳ تا ۶۲.

## References

- Afzal, P., Ahari, H. D., Omran, N. R. and Aliyari, F., 2013- Delineation of gold mineralized zones using concentration–volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 55: 125-133.
- Afzal, P., Eskandarnejad Tehrani, M., Ghaderi, M. and Hosseini, M. R., 2016- Delineation of supergene enrichment, hypogene and oxidation zones utilizing staged factor analysis and fractal modeling in Takht-e-Gonbad porphyry deposit, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 161, 119-127.
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P. and Omran, N. R., 2011- Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration*, 108: 220–232.
- Afzal, P., Ghasempour, R., Mokhtari, A. R. and Asadi Haroni, H., 2015- Application of concentration-number and concentration-volume fractal models to recognize mineralized zones in North Anomaly iron ore deposit, Central Iran. *Archives of Mining Sciences* 60: 777–789.
- Afzal, P., Khakzad, A., Moarefvand, P., Omran, N. R., Esfandiari, B. and Alghalandis, Y. F., 2010- Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 104: 34-46.
- Agterberg, F. P., Cheng, Q., Brown, A. and Good, D., 1996- Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba. *Computer Geosciences* 22(5): 497–507.
- Asadi, H., 2000- The Zarshuran gold deposit model applied in a mineral exploration GIS in Iran. Ph.D. Thesis, ITC, Netherlands, 165pp.
- Asadi, H., Voncken, J., Kühnel, R. and Hale, M., 2000- Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita*, 35: 656-671.
- Bai, J., Porwal, A., Hart, C., Ford, A. and Yu, L., 2010- Mapping geochemical singularity using multifractal analysis: Application to anomaly definition on stream sediments data from Funin Sheet, Yunnan, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 104: 1-11.
- Carranza, E. J. M., 2011- Analysis and mapping of geochemical anomalies using log ratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*, 110: 167-185.
- Cheng, Q. and Li, Q., 2002- A fractal concentration–area method for assigning a color palette for image representation. *Computer Geosciences*, 28: 567–575.
- Cheng, Q. Ping, Q. and Kenny, F., 1997- Statistical and fractal analysis of surface stream pattern in the Oak Ridges Moraine, Ontario, Canada. international Association of Mathematica 1st Geology Meeting, Barcelona, Spain.
- Cheng, Q., Agterberg, F. P. and Ballantyne, S. B., 1994- The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *J Geochem Explor* 51:109–130.
- Cox, D. P. and Singer, D. A., 1986- Mineral deposit models: U.S. Geological Survey Bulletin, 1693: 379 pp.
- Foster, H. J. and Jafarzadeh, A., 1994- The Bafq mining district in Central Iran, a highly mineralized Infracambrian volcanic field. *Economic Geology*, 89: 1697–1721.
- Karimi, M., 1993- The study of petrology, mineralogy, and genesis of Au-As Zarshuran deposit, Takab. Unpublished M.Sc. thesis, Tarbiat Moalem University, Tehran, Iran, 186pp. (in Persian with English abstract)
- Lima, A., Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M. and Albanese, S., 2003- Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy), Campania region. *Applied Geochemistry*, 18: 1853–1865
- Mandelbrot, B. B., 1983- *The Fractal Geometry of Nature*. Macmillan.
- Mehrabi, B., Yardley, B. and Cann, J., 1999- Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 34: 673-696.
- Nazarpour, A., Omran, N. R., Paydar, G. R., Sadeghi, B., Matroud, F. and Nejad, A. M., 2014- Application of classical statistics, log ratio transformation and multifractal approaches to delineate geochemical anomalies in the Zarshuran gold district, NW Iran. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 75: 117-132.
- Sadeghi, B., Moarefvand, P., Afzal, P., Yasrebi, A. B. and Saein, L. D., 2012- Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 9-19.
- Samimi, M., 1992- Reconnaissance and preliminary exploration in the Zarshuran area. Kavoshgaran Engineering Consultant, Tehran, 47pp.
- Wang, Q. F., Deng, J., Liu, H., Yang, L. Q., Wan, L. and Zhang, R. Z., 2010- Fractal models for ore reserve estimation. *Ore Geology Reviews*, 37: 2–14.

## Using fractal models to separation of high-grade mineralization zones in the Zarshuran gold deposit, Takab, NW Iran

Gh. Rostami Paydar<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Assistance Professor, Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Received: 2017 June 18

Accepted: 2018 January 27

### Abstract

The Zarshuran gold deposit in northwest Iran is located in historic gold and arsenic mining area in the Sanandaj-Sirjan geo-structural zone. This area is mainly composed of Precambrian rocks. The Oligo-Miocene granitoid intrusions in Pre-Cambrian formations which are the country rocks of gold mineralization have resulted from intensive alteration, milonitization and gold mineralization. The main aim of these study is the separation of gold mineralization zones by using concentration-number (C-N) and concentration- volume(C-V) fractal techniques, which is based on 44 drill hole data and 5800 analyzed samples. Firstly, the logarithmic graph of gold was plotted for each model. Five gold mineralization zones were identified by using concentration-number model and four zones with concentration- volume model, indicate that intense of gold mineralization in wall rock, weak, medium, high and highly enriched zone, respectively. 3D geologic and fractal models show that low mineralized zones occurred in most of the ore deposits, which are often related to the Iman-Khan rock unit. In addition, based on fractal model interpretations and calculation of the overall accuracy matrices, these regions with medium, high and enriched zone have good overlaps to the Jasperoid rock unit, Chaldagh limestone, and Zarshuran shale units, respectively.

**Keywords:** Fractal models, Mineralization zone, Gold, Zarshuran, Takab

For Persian Version see pages 55 to 66

\*Corresponding author: Gh. Rostami Paydar; E-mail: [rostamigsi2006@gmail.com](mailto:rostamigsi2006@gmail.com)