

ترسیم منحنی‌های عیار- تناژ به روش‌های فرکتالی و مقایسه آن با روش‌های زمین آمار (مطالعه موردی: کانسار طلای کوه زر تربت حیدریه)

حمید گرانیان^{۱*}، بهزاد تخمه‌چی^۲، عباسعلی حیدری^۳

۱- مربی، دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود

۳- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود و مشاور شرکت طلای زر مهر

(دریافت آبان ۹۱، پذیرش آذر ۹۳)

چکیده

تغییرات ذخیره و عیار متوسط بر حسب تغییرات عیار حد که تحت عنوان منحنی‌های عیار- تناژ از آن نام می‌برند، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای سرمایه‌گذاری و تحلیل ریسک و عدم قطعیت برای بهره‌برداری از یک کانسار محسوب می‌شود. به‌طور متداول، برای ترسیم این منحنی‌ها از اطلاعات اکتشافی استفاده کرده و به کمک روش‌های کلاسیک و زمین آمار این کار صورت می‌گیرد. در این مقاله روش‌های جدید فرکتالی برای ترسیم این منحنی‌ها بکار برده شده است. در روش‌های فرکتالی بدون جایگزینی و با حذف داده‌های خارج از ردیف، می‌توان یک رابطه‌ی توانی بین داده‌ها برقرار کرد. سپس به کمک این رابطه می‌توان حجم (در صورت استفاده از متغیر ضخامت)، عیار متوسط (در صورت استفاده از متغیر عیار) و مقدار فلز (در صورت استفاده از متغیر عیار × ضخامت) کانسار را محاسبه کرد و به کمک آن‌ها منحنی‌های عیار-تناژ را ترسیم نمود. یکی از زون‌های کانی‌زایی کانسار طلای کوه زر تربت حیدریه به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است و به کمک روش‌های فرکتالی عددی-اندازه‌ای و عیار-مساحت منحنی‌های عیار-تناژ آن محاسبه و ترسیم شده است. سپس نتایج به‌دست آمده با روش‌های مرسوم زمین آمار مقایسه شده است. محاسبات نشان می‌دهد که حداقل اختلاف بین روش‌های زمین آمار و فرکتالی در برآورد ذخیره صفر و حداکثر ۲/۲٪ و برای عیار متوسط حداقل ۰/۳٪ و حداکثر ۱۴/۴٪ است. عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین نتایج توسط آمار توصیفی ثابت شده است. مهم‌ترین مزیت استفاده از روش‌های فرکتالی استفاده از داده‌های خام، امکان برآورد با داده‌های نامنظم و چگالی کم و محاسبات ساده‌تر است.

کلمات کلیدی

منحنی‌های عیار-تناژ، مدل فرکتالی عددی-اندازه‌ای، مدل فرکتالی عیار-مساحت، کریجینگ، کانسار طلای کوه زر

۱- مقدمه

مقدار فلز (در صورت استفاده از حاصل ضرب متغیر عیار در ضخامت) کانسار را محاسبه کرد و به کمک آن‌ها منحنی‌های عیار-تناژ را ترسیم نمود. برای بررسی صحت منحنی‌های به‌دست‌آمده از مقایسه آن با روش متداول و مهم زمین آمار استفاده خواهد شد. داده‌های کانسار طلای کوه زر تربت حیدریه به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است و منحنی‌های عیار-تناژ در یکی از زون‌های کانی زایی این کانسار به دو روش فرکتالی عددی-اندازه‌ای و عیار مساحت و دو روش زمین آماری کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص برآورد و مقایسه شده است.

۲- مدل‌سازی کانسار برای محاسبات به روش فرکتال

به منظور بررسی و تعیین کمی پارامترهای کانی زایی (عیار، ضخامت و عیار \times ضخامت) نمونه‌برداری‌های اکتشافی در طول پروفیل‌های مختلف و در اعماق متفاوت صورت می‌گیرد. با توجه به عیار حد و حداقل ضخامت کانسار برای استخراج، مرزهای کانسار می‌تواند تعیین گردد. در این صورت عیارهای بزرگ‌تر از عیار حد و ضخامت بزرگ‌تر از حداقل ضخامت قابل استخراج به عنوان متغیر کانی زایی (منطقه قابل استخراج) و بقیه به عنوان متغیر غیر کانی زایی (غیر قابل استخراج) طبقه‌بندی می‌شود. در صورتی که شیب کانسار کمتر از ۴۵ درجه باشد، کلیه داده‌ها بر روی یک نقشه افقی و در صورتی که شیب کانسار بیشتر از ۴۵ درجه باشد، بر روی یک نقشه قائم ترسیم می‌شود. در نقشه افقی، ضخامت قائم کانسار همراه با عیار متوسط هر بلوک و در نقشه قائم، ضخامت افقی کانسار همراه با عیار متوسط در هر بلوک نیز ذکر می‌شود (شکل ۱).

مطابق شکل ۱، اگر فرض بر این باشد که همه‌ی نمونه‌های اکتشافی با فاصله افقی w و فاصله قائم h در یک نقشه قائم (VLP) توزیع شده‌اند، به نحوی که یک مستطیل با ارتفاع h و عرض w به منظور پوشش نمونه‌های اکتشافی کانی زایی قابل استفاده باشد. البته باید این اطمینان حاصل شود که در مرکز هر مستطیل، یک داده اکتشافی قرار دارد. بنابراین اگر تعداد کل داده‌های اکتشافی کانی زایی C_a فرض شود:

محاسبه ذخیره یک کانسار، مهم‌ترین هدف از انجام فعالیت‌های اکتشافی است. مجموعه فعالیت‌های اکتشافی شامل مطالعات زمین‌شناسی، دور سنجی، ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و حفاری، نهایتاً در خدمت مشخص کردن شکل هندسی کانسار و محاسبه ذخیره آن است. اگر چه در هنگام تخمین ذخیره و برآورد عیار متوسط کانسار، فرض بر ثابت بودن عیار حد است، ولی به دلیل تغییرات مداوم در فناوری‌های اکتشاف، استخراج و فرآوری و وجود نوسانات در شرایط اقتصادی بازار که منجر به جابجایی عیار حد می‌شود، داشتن منحنی‌های عیار-تناژ از کانسار به لحاظ ارزیابی ریسک سرمایه‌گذاری ضروری است.

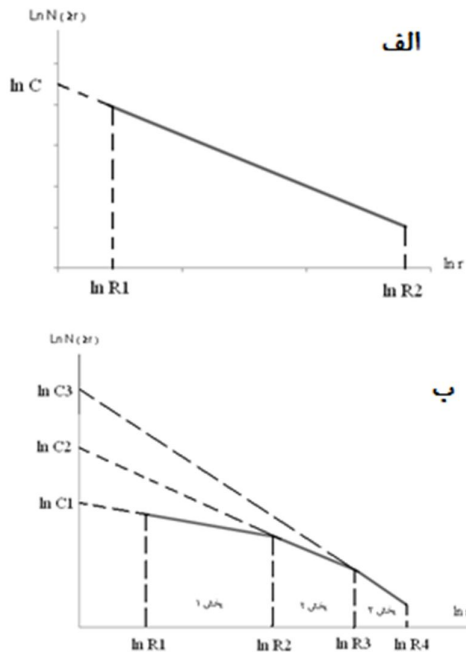
روش‌های ترسیم منحنی‌های عیار-تناژ همانند روش‌های محاسبه ذخیره به سه گروه اصلی روش‌های کلاسیک (هندسه اقلیدسی)، روش‌های زمین آماری و روش‌های جدیدتر (فرکتالی، فازی و ...) تقسیم می‌شود. بررسی تحلیل ریسک و عدم قطعیت در منحنی‌های ترسیمی برای کاهش خطرات سرمایه‌گذاری در بخش معدن لازم است. به این منظور از روش‌های شبیه‌سازی زمین آماری [۱]، شبیه‌سازی فرکتالی گوسی متوالی [۲]، مدل‌سازی زمین‌شناسی [۳] و حجم سنجی [۴] استفاده شده است. در علوم معدنی از هندسه فرکتال و مدل‌های فرکتالی متعددی استفاده شده است [۵]. یکی از کاربردهای مهم هندسه فرکتال در اکتشاف، تعیین آستانه داده‌های ژئوشیمیایی برای تعیین نواحی آنومالی است [۶ و ۷]. ولی از هندسه فرکتال در ارزیابی ذخایر معدنی نیز استفاده شده است [۸ و ۹ و ۱۰].

یکی از مشکلات مهم ترسیم منحنی‌های عیار-تناژ به روش‌هایی که تاکنون متداول بوده است (کلاسیک و زمین آمار)، نحوه‌ی رفتار با داده‌های دارای چولگی (که به علت چند جامعه‌ای بودن و یا وجود داده‌های خارج از ردیف به وجود می‌آید) است. در این مقاله نشان داده خواهد شد که چگونه در روش‌های فرکتالی بدون نرمال‌سازی توزیع داده‌ها و جایگزینی و یا حذف داده‌های خارج از ردیف، می‌توان یک رابطه‌ی توانی بین داده‌ها برقرار کرد. سپس به کمک این رابطه، حجم (در صورت استفاده از متغیر ضخامت)، عیار متوسط (در صورت استفاده از متغیر عیار) و

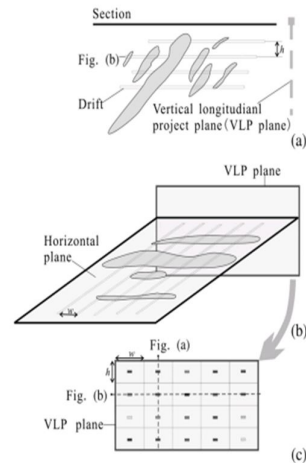
که r نشان‌دهنده هر یک از متغیرهای ذکر شده در بالا است، $N (\geq r)$ تعداد تجمعی داده‌های اکتشافی که متغیر آن‌ها از r کمتر نباشد و D بعد فرکتال است. C ثابت ظرفیت و برابر $(1 \geq N)$ است و نشان‌دهنده تعداد داده‌هایی است که متغیر آن از 1 کوچک‌تر نباشند. اگر از معادله بالا لگاریتم گرفته شود:

$$\ln N (\geq r) = -D \ln r + \ln C \quad (6)$$

این معادله نشان می‌دهد، که اگر $\ln N (\geq r)$ بر حسب $\ln r$ رسم شود یک خط مستقیم با شیب $-D$ به دست می‌آید. این مشخصه توزیع فرکتالی داده‌ها را از توزیع‌های دیگر از قبیل توزیع نرمال، لاگ نرمال و توزیع نمای منفی تفکیک و قابل تشخیص می‌کند. اگر داده‌های رسم شده با یک خط ساده به وسیله روش رگرسیون کمترین مربعات برازش داده شود، داده‌ها دارای توزیع فرکتال ساده هستند (شکل ۲-الف) و اگر به وسیله چند خط مستقیم برازش داده شوند، توزیع داده‌ها از نوع چند فرکتال (فرکتال مرکب) خواهد بود، بدین معنی که مدل‌های فرکتال در هر بخش متفاوت است. در یک مدل چند فرکتال دامنه اندازه متغیر به چندین بخش تقسیم می‌شود که هر بخش دارای آستانه R_i ، بعد فرکتال D_i و ثابت ظرفیت C_i خواهد بود (شکل ۲-ب).



شکل ۲: برازش داده‌ها با مدل فرکتال ساده (الف)، مدل فرکتال مرکب (ب) [۱۱]



شکل ۱: مراحل تصویر داده‌های اکتشافی در یک نقشه قائم [۱۱]

$$A_i = wh \quad (1)$$

$$A = C_a A_i = C_a wh \quad (2)$$

که A_i مساحت هر مستطیل و A مساحت کل منطقه کانی زایی (منطقه قابل استخراج) است. از حاصل ضرب پارامتر عیار- ضخامت داده‌های اکتشافی در منطقه کانی زایی (I_i) در عرض w و ارتفاع h ذخیره فلز M_i و به‌طور مشابه از ضرب ضخامت کانسار t_i در عرض w و ارتفاع h ذخیره ماده معدنی O_i در هر مستطیل به دست می‌آید. با جمع ذخیره فلز کل مستطیل‌ها ذخیره کل فلز کانسار M و از جمع ذخیره ماده معدنی کل مستطیل‌ها ذخیره کل ماده معدنی در منطقه کانی زایی O به دست می‌آید. بنابراین:

$$O = \sum_{i=1}^{C_a} O_i = \sum_{i=1}^{C_a} wh t_i = wh \sum_{i=1}^{C_a} t_i = \quad (3)$$

$$A_i \sum_{i=1}^{C_a} t_i = \frac{A}{C_a} \sum_{i=1}^{C_a} t_i$$

$$M = \sum_{i=1}^{C_a} M_i = \sum_{i=1}^{C_a} wh l_i = \quad (4)$$

$$wh \sum_{i=1}^{C_a} l_i = A_i \sum_{i=1}^{C_a} l_i = \frac{A}{C_a} \sum_{i=1}^{C_a} l_i$$

این مراحل را می‌توان عیناً بر روی نقشه‌های افقی تکرار و نتایج مشابه را به دست آورد [۱۱].

۳- الگوریتم فرکتالی مدل عددی - اندازه‌ای

مطالعات نشان می‌دهد، متغیرهای همچون عیار، ضخامت و عیار \times ضخامت در یک کانسار از مدل فرکتالی عددی اندازه‌ای که اولین بار به وسیله مندلیبرت ارائه شده، تبعیت می‌کند [۱۲]، بنابراین:

$$N (\geq r) = Cr^{-D} \quad (5)$$

مساحت با ذخیره را نشان می‌دهد. در صورتی که توزیع داده‌ها از نوع فرکتال مرکب باشد:

$$O = \rho AT_1^{D_1} \left[\frac{D_1(T_2^{1-D_1} - T_1^{1-D_1})}{1-D_1} + \sum_{i=2}^n \frac{D_i \prod_{j=2}^i T_j^{D_j - D_{j-1}}}{1-D_i} (T_{i+1}^{1-D_i} - T_i^{1-D_i}) \right] \quad (12)$$

که T_1 برابر t_{min} و T_n برابر t_{max} است [۱۱]. اگر ضخامت هر بلوک مستطیلی در نقشه VLP برای پوشش نمونه‌های فضای سه‌بعدی برابر e فرض شود:

$$O_a = \rho h w e C_c \quad (13)$$

$$O = \rho h w e C_a \quad (14)$$

که C_c تعداد کل نمونه‌ها و C_a تعداد نمونه‌هایی که عیار آن‌ها از عیار حد G_c کمتر نباشد. بنابراین O_a جرم کل توده کانی زایی (ذخیره زمین‌شناسی) و O تناژ کانسنگ قابل استخراج خواهد بود. با توجه به اینکه عیار از مدل فرکتالی عددی-اندازه‌ای تبعیت می‌کند، با توجه به معادله ۵ و ۷ معادلات فوق به شکل زیر در می‌آیند:

$$O_a = \rho h w e C G_a^{-D} \quad (15)$$

$$O = \rho h w e C G_c^{-D} \quad (16)$$

که G_a کمترین عیار نمونه‌ها است. بنابراین با ترکیب این دو معادله چنین حاصل می‌شود:

$$O = O_a \left(\frac{G_c}{G_a} \right)^{-D} \quad (17)$$

در مدل فرکتال مرکب معادله ۱۷ به صورت زیر خواهد بود:

$$O = \frac{O_a G_c^{-D_i}}{G_a^{-D_1}} \prod_{j=2}^i G_j^{D_j - D_{j-1}} \quad (18)$$

این معادلات نشان می‌دهند که بین جرم توده کانی‌زایی و تناژ کانسار با عیار حد یک رابطه فرکتالی وجود دارد [۱۰ و ۱۳]. از آنجا که پارامتر عیار نیز از مدل توزیع فرکتالی تبعیت می‌کند، با توجه به معادله ۵ برای عیار رابطه‌ی زیر برقرار خواهد بود:

$$G_m = \frac{\int_{g_c}^{g_{max}} \frac{dN(\geq g)}{dg} g dg}{C G_c^{-D} - C G_{max}^{-D}} = \frac{D(G_{max}^{1-D} - G_c^{1-D})}{(1-D)(G_c^{-D} - G_{max}^{-D})} \quad (D > 0, D \neq 1) \quad (19)$$

که g پارامتر عیار، G_c عیار حد، G_{max} بیشینه عیار عنصر در داده‌های اکتشافی و G_m عیار متوسط کانسار است. این معادله برای مدل فرکتال ساده پیشنهاد شده است. در صورتی که داده‌ها دارای توزیع چند فرکتالی باشند رابطه به شکل رابطه‌ی ۲۰ خواهد بود:

آستانه R_i مقداری از پارامتر Γ است که مرز جدایش دو بخش خط مستقیم مجاور را مشخص می‌کند. در صورتی که پارامتر Γ مربوط به ضخامت کانسار باشد R_i را با T_i و اگر Γ مربوط به پارامتر عیار \times ضخامت باشد با L_i و در صورتی که مربوط به عیار باشد با G_i نشان می‌دهند. اگر نرخ تغییرات از یک بخش به بخش دیگر زیاد باشد، مقدار آستانه به راحتی قابل انتخاب خواهد بود، ولی در صورتی که نرخ تغییرات آهسته باشد، می‌توان انتخاب آستانه را با بیش‌ترین مقدار مجموع ضرایب رگرسیون دو خط مجاور برازش داده‌شده تطبیق داد.

در مدل فرکتال وقتی متغیر Γ_{min} برابر ۱ باشد، ثابت ظرفیت C برابر تعداد کل داده‌های اکتشافی کانی‌زایی C_a است. ولی هنگامی که کمترین حد Γ_{min} معادل ۱ نباشد، با استفاده از ابعاد فرکتال D و ثابت ظرفیت C ، تعداد کل داده‌های اکتشافی C_a را می‌توان محاسبه کرد. بنابراین:

$$C_a = C \Gamma_{min}^{-D} \quad (7)$$

$$C_a = C_1 r_{min}^{-D_1} \quad (8)$$

معادله ۷ مربوط به مدل فرکتال ساده و معادله ۸ مربوط به مدل چند فرکتال است [۱۱].

۳-۱- ترسیم منحنی‌های عیار-تناژ با روش فرکتالی عددی-اندازه‌ای

با توجه به اینکه ضخامت کانسار یک متغیر پیوسته است و از توزیع فرکتال تبعیت می‌کند، حجم کانسار (V) با فرض اینکه w و h به اندازه کافی کوچک باشند، از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$V = \int_{t_{min}}^{t_{max}} w h \frac{dN(\geq t)}{dt} t dt = \frac{whCD}{1-D} (t_{max}^{1-D} - t_{min}^{1-D}) \quad (D > 0, D \neq 1) \quad (9)$$

که t_{min} حداقل ضخامت قابل استخراج و t_{max} بیش‌ترین ضخامت ماده معدنی در داده‌های اکتشافی است. بنابراین ذخیره ماده معدنی برابر است با:

$$O = \frac{\rho whCD}{1-D} (t_{max}^{1-D} - t_{min}^{1-D}) \quad (D > 0, D \neq 1) \quad (10)$$

که ρ چگالی متوسط ماده معدنی است. با توجه به معادلات ۷ و ۱۰، معادله ۱۰ برابر است با:

$$O = \frac{\rho AD t_{min}^D}{1-D} [t_{max}^{1-D} - t_{min}^{1-D}] \quad (11)$$

معادله ۱۱ اجازه را می‌دهد که در صورت داشتن مساحت کانسار و توزیع فرکتال ضخامت کانسار، ذخیره کانسار برآورد شود. همچنین این معادله رابطه مستقیم

نقشه‌های پربندی به‌طور فضایی به n بخش تقسیم می‌شود، بنابراین کیفیت کانی‌زایی نیز به n گروه تفکیک می‌گردد. متغیرها در آمین بخش در دامنه R_i و R_{i+1} است و توزیع آن به وسیله بعد فرکتال D_i تعیین می‌شود. با فرض اینکه ضخامت کانسار یک متغیر پیوسته است، ذخیره محلی O_i در آمین بخش می‌تواند این‌طور بیان شود:

$$O_i = \int_{T_i}^{T_{i+1}} \frac{\rho C_i dA(\geq t)}{dt} t dt = \frac{\rho C_i D_i}{1-D_i} (T_{i+1}^{1-D_i} - T_i^{1-D_i}) \quad (D \neq 1) \quad (22)$$

بنابراین ذخیره کل ماده معدنی O را می‌توان به صورت

زیر نوشت:

$$O = \sum_{i=1}^n O_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\rho C_i D_i}{1-D_i} (T_{i+1}^{1-D_i} - T_i^{1-D_i}) \right] \quad (D \neq 1) \quad (23)$$

به‌طور مشابه ذخیره فلز محلی M_i را می‌توان از رابطه

زیر به دست آورد:

$$M_i = \frac{\rho C_i D_i}{1-D_i} [L_{i+1}^{1-D_i} - L_i^{1-D_i}] \quad (D \neq 1) \quad (24)$$

بنابراین ذخیره کل فلز M برابر است با:

$$M = \sum_{i=1}^n \frac{\rho C_i D_i}{1-D_i} [L_{i+1}^{1-D_i} - L_i^{1-D_i}] \quad (D \neq 1) \quad (25)$$

عیار متوسط کانسار نیز از تقسیم ذخیره فلز بر ذخیره

کل ماده معدنی (معادله ۲۴) به دست می‌آید [۱۴].

$$G = \frac{M}{O} \quad (26)$$

بنابراین با محاسبات بالا، امکان ترسیم منحنی‌های

عیار-تناژ با این روش میسر خواهد شد.

۵- کانسار طلای کوه زر تربت‌حیدریه

کانسار طلای کوه زر در ۱۸۰ کیلومتری جنوب شهر مشهد و در ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهر تربت‌حیدریه در استان خراسان رضوی واقع شده است. منطقه کوه زر به واسطه قرار گرفتن در کمربند ولکانوپلوتونیک واقع در شمال گسل درونه از نظر سنگ‌شناسی بیشتر شامل سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی از نوع سنگ‌های آذر آواری-آتشفشانی با ترکیب آندزیتی-داسیتی و بندرت ریولیتی و توده‌های نفوذی با ترکیب گرانیتوئیدی است. ولی سنگ‌های رسوبی نیز هر چند ناچیز و با گسترش کم، در منطقه رخنمون دارند (شکل ۳). در منطقه کوه زر کانی‌سازی‌های متنوعی از نظر کانی‌شناسی و فاز تشکیل وجود دارد. این کانی‌سازی‌ها همچنین از نظر همراهی و یا

$$G_m = \frac{C_i D_i (G_{i+1}^{1-D_i} - G_c^{1-D_i}) + \sum_{j=i+1}^n \frac{C_j D_j (G_{j+1}^{1-D_j} - G_j^{1-D_j})}{1-D_j}}{C_i G_c^{-D_i} - C_n G_{max}^{-D_n}} \quad (20)$$

که i برابر بخش i ام که عیار حد در آن قرار دارد و G_n برابر G_{max} است. در این رابطه می‌توان عیار متوسط را از روی عیار حد به دست آورد [۱۱]. بنابراین با تغییر عیار حد، عیار متوسط نیز تغییر خواهد کرد. با محاسبه ذخیره و عیار متوسط به ازای عیار حد‌های متفاوت، منحنی‌های عیار-تناژ نیز به دست می‌آیند.

۴- الگوریتم فرکتالی مدل غلظت-مساحت

در این روش همانند مدل فرکتالی عددی-اندازه‌ای، پس از ترسیم مقطع افقی یا قائم و انتقال داده‌ها به آن، بر اساس عیار حد و حداقل ضخامت قابل استخراج، مرزهای ماده معدنی در مقطع ترسیم و مساحت ماده معدنی محاسبه می‌شود. بر اساس داده‌های گسسته در مقطع، نقشه‌های پربندی متغیرهای کانی‌زایی (عیار و عیار × ضخامت) به روش درون‌یابی عکس فاصله وزن‌دار ترسیم می‌شود. در این نقشه‌ها مساحت محصورشده به وسیله پربندها، دارای یک رابطه توانی با متغیر کانی‌زایی (r_i) به صورت زیر است:

$$A(\geq r) = C r_i^{-D} \quad (21)$$

که $A(\geq r)$ مساحت، D بعد فرکتال و C ضریب ثابت است. معادله ۲۱ نشان می‌دهد که اگر نقاط $A(\geq r)$ بر حسب r در یک نمودار تمام لگاریتمی ترسیم شود، به روش رگرسیون کمترین مربعات می‌توان به نقاط بر حسب اینکه داده‌ها از مدل فرکتال ساده یا چند فرکتالی تبعیت می‌کنند، به ترتیب یک یا چند خط مستقیم برازش داد. در مدل فرکتالی غلظت-مساحت، بعد فرکتال دلالت بر الگوی توزیع فضایی متغیرهای کانی‌زایی دارد. بعد فرکتال بزرگ‌تر نشان‌دهنده‌ی یک کاهش سریع‌تر به طرف خارج موقعیت نمونه، یا تراکم بالای پربندها اطراف نمونه است؛ که این مطلب می‌تواند یک تغییر فضایی بزرگ‌تر نامیده شود [۱۴].

۴-۱- ترسیم منحنی‌های عیار تناژ با روش فرکتالی

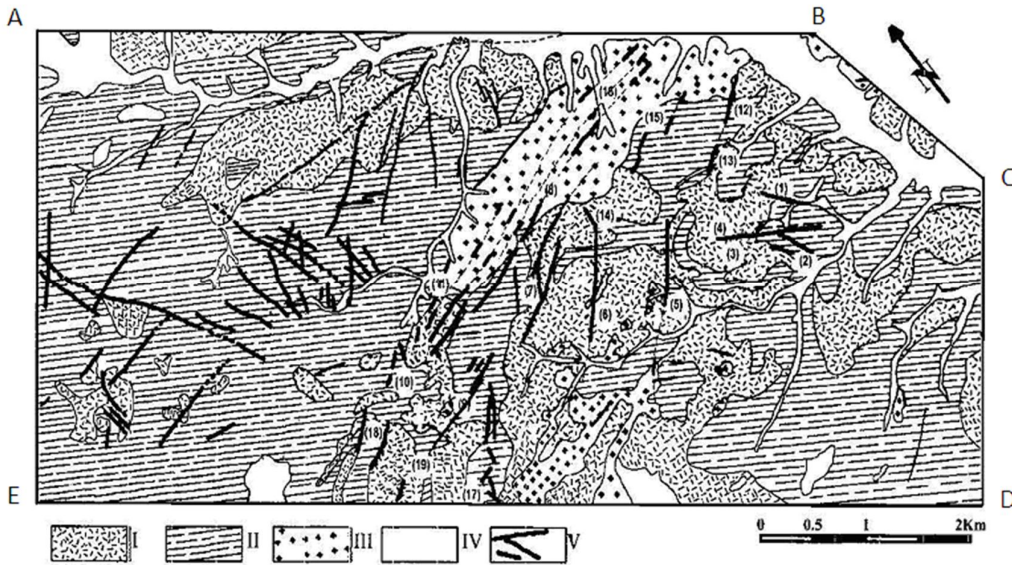
عیار-مساحت

با فرض اینکه مدل غلظت-مساحت شامل n قطعه خط مستقیم باشد، آمین قطعه به وسیله آستانه‌های R_i و R_{i+1} محدود می‌شود ($i = 1, 2, \dots, n$)، R_1 کمترین مقدار متغیر و بیش‌ترین مقدار است). بر طبق مقادیر آستانه‌ها،

است. در برخی زون‌های کانی سازی منطقه کوه زر پیریت به مقدار ناچیز مشاهده می‌شود. در مرحله هوازدگی سوپرژن کانی پیریت به هماتیت و گوتیت و کانی کالکوپیریت به گوتیت، کالکوسیت، مالاکیت و مقادیر اندکی کوولیت و بورنیت تبدیل شده‌اند. از این رو در رخنمون‌های سطحی کالکوپیریت بندرت و پیریت بسیار نادر است و رگه‌های با کانی سازی نوع دوم در رخنمون‌ها با حضور مالاکیت مشخص می‌شوند [۱۵].

عدم همراهی کانی سازی طلا و میزان عیار آن متفاوت‌اند. دو نوع دسته کانی سازی هیپوژن طلا دار در کانسار طلای کوه زر عبارت‌اند از:

- اسپیکولاریت + کوارتز + طلا
 - اسپیکولاریت + کوارتز + کالکوپیریت + پیریت + طلا
- کلسیت، سیدریت و باریت نیز به‌طور محدود و محلی در این دو نوع کانی سازی وجود دارند. کانی سازی غالب منطقه کوه زر عمدتاً از نوع اول است و کانی سازی مس دار (نوع دوم) در منطقه کوه زر از فراوانی بسیار کمی برخوردار



شکل ۳: نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه کوه زر (I - توف اسیدی - حد متوسط، II - گدازه‌های آندزیتی، III - گرانیت تا مونزونیت، IV - ته نشست‌های کواترنره و VII - گسل‌های وابسته به کانی سازی). زون‌های کانی سازی (I - زون علیبرضا، II - غار کفتری، III - کوه زر مرکزی، IV - کوه زر غربی، V - غار صالحه، VI - تنگه پیازی، VII - تاریک دره، VIII - محمد بیگی، IX - امرالهی، X - حسین آباد، XI - بازه موشی، XII - شمال فرشمی I، XIII - شمال فرشمی II، XIV - شاه علی، XV - قله خرد، XVI - زون‌های کانی سازی در سنگ‌های نفوذی، XVII - خشک بازه، XVIII - بازه آستانه و XIX - انجیر بازه). [۱۵]

کانسارها در مقایسه با کانسارهای پورفیری مس، دارای سولفید کمتر، آهن بیشتر، سرب و روی کمتر و طلای بیشتر هستند [۱۶].

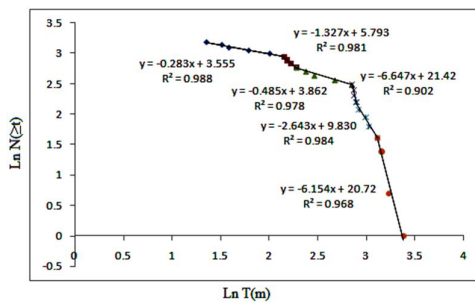
در منطقه کوه زر ۲۳ زون کانی‌زایی شناسایی شده است (شکل ۳). با توجه به وجود اطلاعات اکتشاف تکمیلی در محدوده غار صالح (حفر ۲۴ حلقه گمانه) این محدوده به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. مغزه‌های به‌دست‌آمده از حفاری برای عنصر طلا مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفته است. اکثر مغزه‌ها دارای طول حدود ۱ متر هستند. حداقل طول مغزه آنالیز شده ۳۰ سانتیمتر و حداکثر ۴/۲۰ متر است. تعداد نمونه‌های آنالیز شده در

کانی سازی طلای کوه زر به‌طور کلی در دسته کانسارهای مس - طلا همراه با اکسیدهای آهن قرار می‌گیرد و از نظر منشأ محلول‌های کانه‌سازی احتمالاً مرتبط با توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی جنوب منطقه است. این کانسارها که اخیراً مورد توجه و مطالعه قرار گرفته‌اند، در شرایط تکتونیکی متفاوتی از قبیل: ۱- حوضه‌های کششی پشت کمر بند فرو رانش، ۲- ریف‌های درون قاره‌ای، ۳- نقاط داغ داخل قاره‌ای و ۴- حوضه‌های کششی بعد از تصادم قاره‌ای تشکیل می‌شوند و کانی سازی به صورت جان‌شینی، استوک ورک، پراکنده، برشی هیدروترمالی، رگه‌ای و استراتی باند گزارش شده است. این

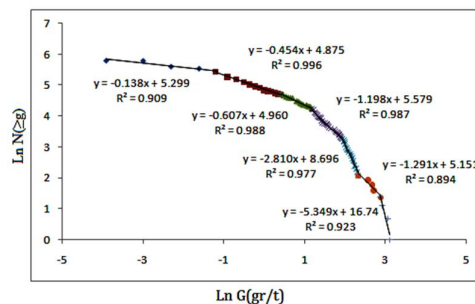
تعیین مساحت تخمین بر روی نقشه افقی، فرض شده است که کانسار تا فاصله حدود یک چهارم فاصله متوسط بین گمانه‌ها گسترش دارد.

۶-۱- مدل فرکتالی عددی-اندازه‌ای

مدل فرکتالی ضخامت قائم زون کانی‌زایی در محدوده غار صالح (شکل ۵)، از نوع فرکتال مرکب است. با توجه به تغییرات در شیب داده‌ها، مجموعه داده‌ها به شش بخش تقسیم شده است. داده‌های هر بخش به روش رگرسیون کمترین مربعات با یک خط مستقیم برازش داده شده است که معادله خطوط به همراه ضریب همبستگی داده‌های هر بخش نیز در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به معادله خطوط پارامترهای فرکتالی (آستانه‌ها و ابعاد فرکتال) محاسبه شده است. با فرض اینکه چگالی متوسط کانسنگ ۲/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب باشد و با استفاده از معادله ۱۲ جرم کل توده کانی سازی شده برآورد می‌شود.



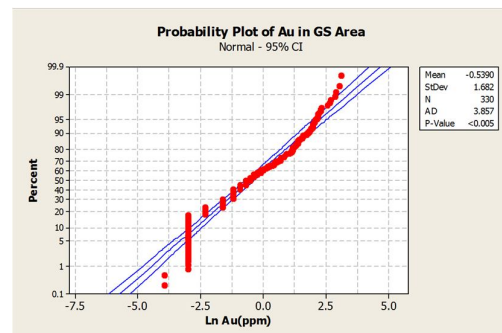
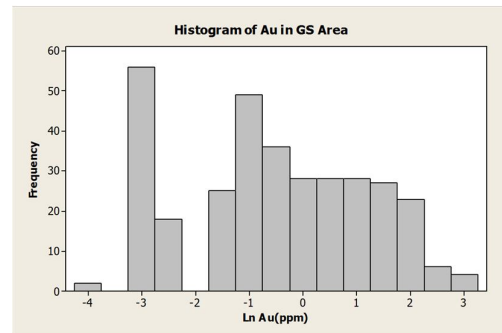
۵: مدل فرکتالی ضخامت قائم کل توده زون کانی سازی شده



۶: مدل فرکتالی داده‌های عیار مغزه‌ها

به منظور محاسبه ذخیره اقتصادی محدوده غار صالح با انتخاب عیار حد مشخص، باید از داده‌های عیار مغزه‌های آنالیز شده استفاده کرد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، مدل فرکتالی عیار نیز از نوع فرکتال مرکب است که به منظور تطبیق داده‌ها با معادله خطوط مستقیم،

محدوده غار صالح ۳۲۹ عدد است. در شکل ۴ هیستوگرام و نمودار احتمال لگاریتمی داده‌های عیار مغزه‌های آنالیز شده برای این محدوده ارائه شده است. با توجه به اینکه داده‌ها دارای توزیع L می‌باشند، لذا از مقادیر لگاریتمی داده‌ها برای بررسی لاگ نرمال بودن توزیع داده‌ها استفاده شده است. مطابق شکل‌ها ۴، توزیع داده‌ها به جز در مقادیر کرانه‌ای تقریباً لاگ نرمال است. میانگین عیار طلا در محدوده غار صالح ۱/۹ gr/t و انحراف معیار آن ۳/۲۲ gr/t است.



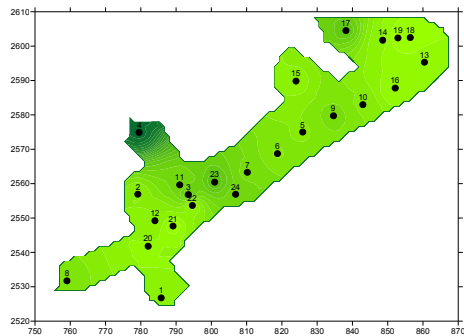
شکل ۴: هیستوگرام و نمودار احتمال داده‌های لگاریتمی عیار طلا در محدوده غار صالح

۶-۲ ترسیم منحنی‌های عیار-تناژ به روش‌های فرکتالی

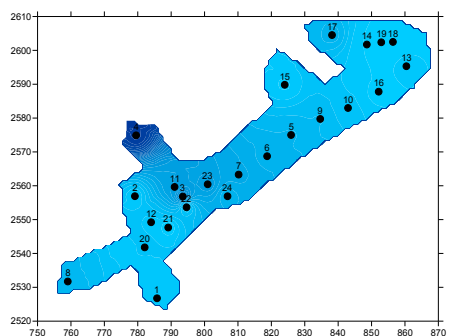
مهم‌ترین شرط برای محاسبات به روش فرکتال، تبعیت کردن داده‌ها از توزیع فرکتالی است. برای این منظور باید بین داده‌ها یک رابطه‌ی توانی برقرار باشد که در ادامه وجود این رابطه توانی اثبات خواهد شد. اولین گام در محاسبات، مدل‌سازی داده‌ها بر روی نقشه افقی است. برای این منظور طول قائم زون کانی‌زایی، ضخامت قائم کانسار با عیار بیشتر از عیار حد (با عیار حدهای مختلف) و میانگین عیار برای هر حالت را در هر گمانه محاسبه شده است. سپس برای

از متوسط نقاط پراکنده در منطقه تحت بررسی است و وزن نسبت داده شده به هر نقطه با فاصله گرفتن از نقطه درون‌یابی به صورت نمایی کاهش می‌یابد. برای تهیه نقشه‌های کنتری از شعاع پنجره جستجوی ۲۰ متری (با توجه به فاصله متوسط گمانه‌ها)، با حداکثر ۱۵ نقاط داخل هر پنجره و توان وزنی ۲ استفاده شده است.

شکل ۸ نقشه پربندی ضخامت قائم کانسار (با عیار حد $1/5 \text{ gr/t}$) که از اطلاعات گمانه‌ای به دست آمده است را نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت گمانه‌ها نیز نشان داده شده است. تغییرات ضخامت از حداقل $0/91$ متر تا حداکثر $22/50$ متر در نوسان است. مدل فرکتالی عیار-مساحت بر روی داده‌های شکل ۸ با توجه به معادله ۲۱ انجام شده است. داده‌های مدل فرکتالی ضخامت-مساحت به دست آمده بر روی محورهای لگاریتمی ترسیم شده است (شکل ۱۰). با توجه به تبعیت داده‌ها از مدل فرکتال مرکب، داده‌ها به شش بخش تقسیم شده است. برای محاسبه ذخیره اقتصادی محدوده با عیار حد $1/5 \text{ gr/t}$ ، از پارامترهای فرکتالی به دست آمده از شکل ۱۰ و معادله ۲۳ استفاده می‌شود.

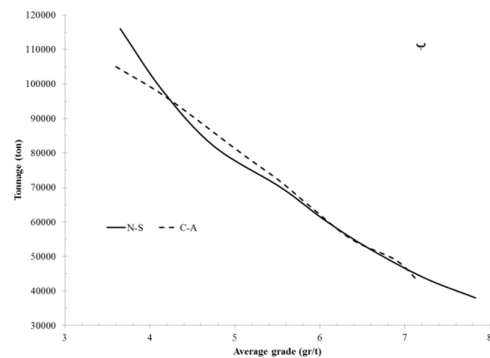
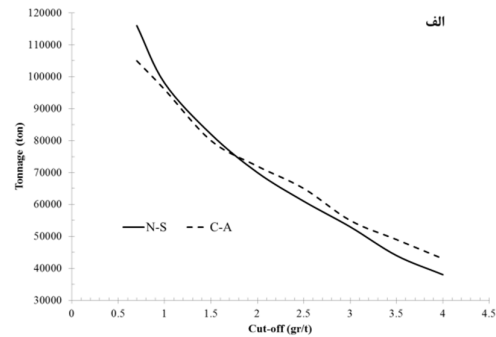


شکل ۸: نقشه پربندی ضخامت کانسار در محدوده غار صالح



شکل ۹: نقشه پربندی عیار×ضخامت کانسار در محدوده غار صالح

باید داده‌ها را به چند بخش تقسیم شود. در شکل ۶ مدل فرکتالی داده‌های عیار در هفت بخش (به نحوی که بتوان منحنی مدل فرکتالی را با حداقل خطوط مستقیم با بیش‌ترین ضریب همبستگی برازش داد) مدل‌سازی شده است. به کمک پارامترهای فرکتالی به دست آمده از شکل ۶ و معادله ۱۸، ذخیره اقتصادی و معادله ۲۰، عیار متوسط محدوده به ازای عیار حدهای انتخابی برآورد می‌شود. منحنی‌های عیار-تناژ به دست آمده از روش فرکتالی عددی-اندازه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: منحنی‌های عیار-تناژ به دست آمده با روش‌های فرکتالی (الف: منحنی عیار حد-تناژ، ب: منحنی عیار متوسط-تناژ)

۶-۲- مدل فرکتالی عیار-مساحت

به منظور تهیه نقشه پربندی از تغییرات عیار× ضخامت و ضخامت در نقشه افقی برای محاسبات مورد نیاز در مدل فرکتالی عیار-مساحت، از روش درون‌یابی پنجره متحرک عکس فاصله وزن دار استفاده شده است. روش درون‌یابی عکس فاصله وزن دار بر اساس این فرض است که نقاط درون‌یابی شده بایستی تأثیر بیشتری از متغیر نزدیک و تأثیر کمتری از متغیر دورتر داشته باشد. این روش مشکل اثر هموارشدگی که در روش کریجینگ وجود دارد را نیز ندارد. در این روش سطح درون‌یابی، پنجره متحرک، وزنی

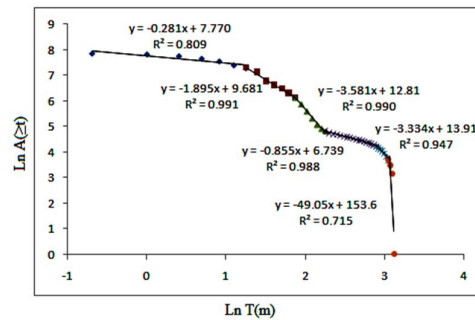
متوسط محدوده غار صالح به ازای عیار حدهای متفاوت قابل محاسبه است. در شکل ۷ منحنی‌های عیار-تناژ به دست آمده به روش فرکتالی عیار-مساحت نیز نشان داده شده است.

۷- ترسیم منحنی‌های عیار-تناژ به روش زمین آمار

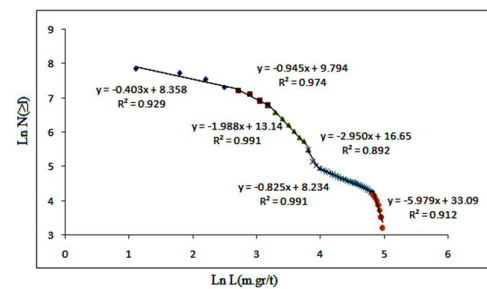
اولین گام در محاسبات زمین آماری، کمپوزیت کردن داده‌ها است. برای این منظور داده‌های گمانه‌ای برای طول یک متر کمپوزیت شده است. منحنی فراوانی نما و نمودار Q-Q داده‌ها (شکل ۱۲) نشان دهنده نرمال نبودن داده‌ها خصوصاً در بخش‌های کرانه‌ای است. داده‌ها از توزیع L تبعیت می‌کنند که در آن کمترین عیارها بیشترین فراوانی و عیارهای بالا فراوانی بسیار کمی دارند. برای نرمال کردن داده‌ها از توزیع لاگ نرمال سه پارامتره استفاده شده است. پس از نرمال کردن داده‌ها برای کاهش اثر داده‌های خارج از ردیف از روش دورفل استفاده شده است. در روش دورفل برای تشخیص مقادیر خارج از ردیف از بین ۳۹۵ داده استفاده شد، در سطح اعتماد ۹۵٪ (سطح معنی‌دار ۵٪)، مقدار g به ازای ۳۹۵ نمونه تقریباً برابر ۴ است. پس از محاسبه $\bar{X} + 4S$ ، سه نمونه با بیشترین عیار طلا به عنوان مقادیر خارج از ردیف شناخته شده که با مقدار حد آستانه‌ای ۱۳/۳۸۶ جایگزین شده است.

گام بعدی در محاسبات زمین آماری، بررسی وجود روند در داده‌ها است. از این رو، از دو روش رسم نمودار پراکندگی داده‌ها نسبت به محورهای مختصات و واریوگرام غیر جهتی استفاده شده است. در صورت وجود روند در داده‌ها از کریجینگ عام و در غیر این صورت از کریجینگ معمولی استفاده می‌شود که در محدوده مورد نظر، روندی در داده‌ها مشاهده نشده است. برای انجام عملیات کریجینگ از دو روش کریجینگ معمولی (تخمین‌گر خطی) بر روی داده‌های نرمال شده و کریجینگ شاخص (تخمین‌گر غیرخطی) بر روی داده‌های اولیه برای تخمین عیار بلوک‌ها استفاده شده است. ابعاد بلوک‌های تخمین ۲/۵×۲/۵×۲/۵ متری است.

برای محاسبه عیار متوسط محدوده، به ازای عیار حد ۱/۵ gr/t، لازم است از فرمول ۲۶ استفاده شود. لذا بایستی در ابتدا مقدار فلز طلای محدوده را برآورد نمود. برای این منظور از متغیر کانی سازی عیار× ضخامت استفاده می‌شود؛ بنابراین از حاصل ضرب عیار متوسط هر گمانه در ضخامت آن، مقدار این متغیر محاسبه می‌شود. در شکل ۹ نقشه پربندی این متغیر که به روش درون‌یابی پنجره متحرک عکس فاصله وزن دار تهیه شده است، نشان داده شده است. کمترین مقدار متغیر ۱/۳۶۵ m.gr/ton و بیشترین مقدار آن ۱۴۶/۷ m.gr/ton است. با انجام تحلیل فرکتالی عیار-مساحت (در اینجا عیار× ضخامت-مساحت) بر روی داده‌های نقشه درون‌یابی شده، نقاط شکل ۱۱ حاصل می‌شود.

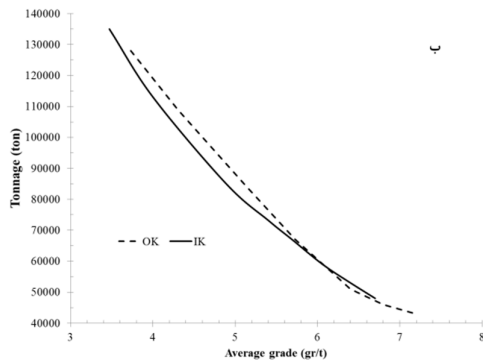
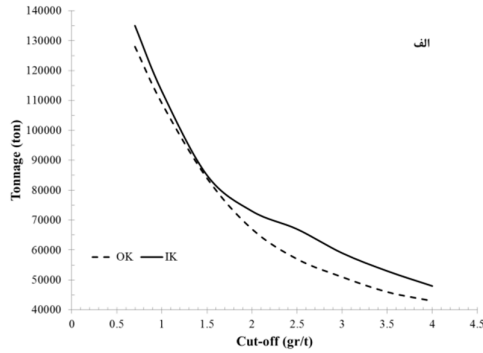


شکل ۱۰: مدل فرکتالی عیار-مساحت برای متغیر ضخامت



شکل ۱۱: مدل فرکتالی عیار-مساحت برای متغیر عیار× ضخامت

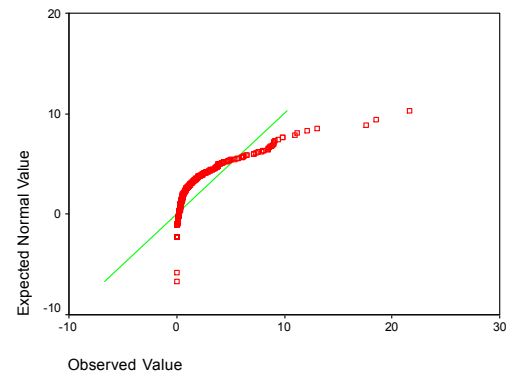
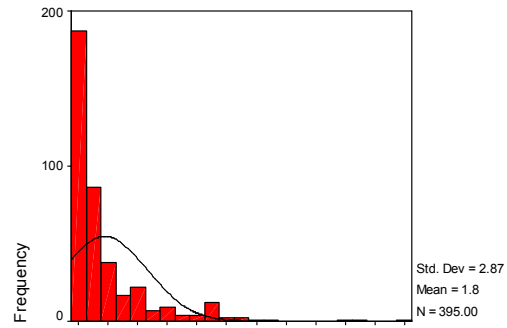
با توجه به نحوه پراکندگی نقاط در شکل ۱۱، داده‌ها به شش بخش تقسیم شده است. پارامترهای فرکتالی داده‌های هر بخش از معادله خطوط که به روش رگرسیون کمترین مربعات به دست آمده است، برآورد می‌شود. ذخیره طلای محدوده به کمک معادله ۲۵ برآورد شده است؛ بنابراین عیار متوسط محدوده نیز به کمک معادله ۲۶ محاسبه می‌شود. در صورت تکرار عملیات فوق ذخیره و عیار



شکل ۱۳: منحنی‌های عیار - تناژ به دست آمده با روش‌های زمین آمار (الف: منحنی عیار حد - تناژ و ب: منحنی عیار متوسط - تناژ)

۲-۷- کریجینگ شاخص

برای این منظور از روش کریجینگ شاخص چندگانه استفاده شده است. ابتدا مقادیر آستانه‌های معادل تابع فراوانی تجمعی (cdf) داده‌های اولیه در مقادیر ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴، ۰.۵، ۰.۶، ۰.۷، ۰.۸ و ۰.۹ تعیین شده و سپس برای هر آستانه واریوگرام شاخص توسط نرم‌افزار WinGslib مدل‌سازی شده است. عملیات کریجینگ شاخص نیز توسط نرم‌افزار WinGslib بر روی داده‌های اصلاح شده با استفاده از مشخصات بیضی ناهمسانگردی، حداکثر و حداقل نقاط شرکت‌کننده در تخمین انجام شده است. نتایج به دست آمده از بخش قبل که به صورت عددی بین ۰ تا ۱ برای هر بلوک و برای هر آستانه است، به عنوان داده ورودی مجدداً به نرم‌افزار WinGslib وارد شده و تخمین E-type از روی ۱۰۰ مقدار گسسته برای هر بلوک به روش درون‌یابی توانی انجام شده است که نتایج آن به صورت منحنی‌های عیار - تناژ در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: نمودار فراوانی نما و نمودار Q-Q داده‌های کمپوزیت شده

۱-۷- کریجینگ معمولی

عملیات تخمین عیار و واریانس تخمین عیار بلوک‌ها توسط کریجینگ معمولی به کمک نرم‌افزار WinGslib بر روی داده‌های تبدیل یافته لگاریتمی سه پارامتری عیارهای طلا انجام شده است. به منظور برگشت عیارهای تبدیل یافته به مقدار واقعی ضمن حفظ شرایط حداقل واریانس تخمین، از فرمول ارائه شده توسط کلارک به صورت زیر استفاده شده است:

$$C = G_{Log} + \frac{\sigma_{kLog}^2}{2} + \frac{\bar{y}(v, v)}{2} - \mu \quad (27)$$

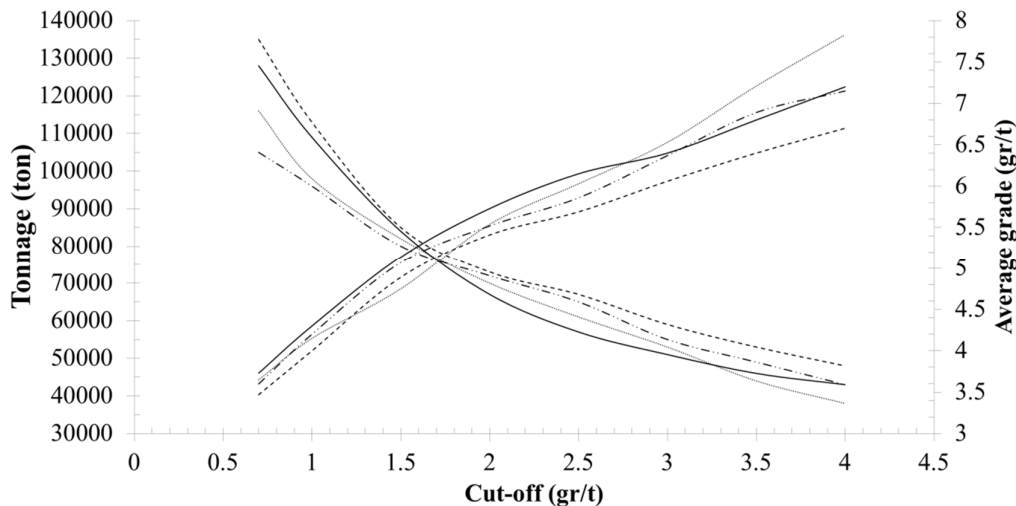
که G_{Log} عیار تخمین خورده بلوک در مقیاس لگاریتمی، σ_{kLog}^2 واریانس تخمین عیار لگاریتمی بلوک مورد نظر، μ ضریب لاگرانژ که از حل دستگاه معادلات کریجینگ به دست می‌آید و $\bar{y}(v, v)$ مقدار متوسط واریوگرام درون بلوکی است [۱۷]. بنابراین عیار هر بلوک برابر $\theta + 1.0^C$ است. نتایج محاسبات به صورت منحنی‌های عیار - تناژ در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

۸- نتیجه‌گیری

منحنی‌های ذخیره بین منحنی به‌دست‌آمده از روش کریجینگ معمولی و روش فرکتالی عددی-اندازه‌ای مشاهده می‌شود. در بین منحنی‌های عیار متوسط، بهترین تطابق بین منحنی روش کریجینگ معمولی و روش فرکتالی عیار-مساحت است. همچنین حداکثر اختلاف در برآورد ذخیره ۲۲/۲٪ بین روش فرکتالی عیار-مساحت و کریجینگ شاخص در عیار حد ۰/۷ gr/t و حداقل آن صفر درصد بین روش فرکتالی عیار-مساحت و کریجینگ معمولی در عیار حد ۴ gr/t اتفاق افتاده است. همچنین حداکثر اختلاف در برآورد عیار متوسط محدوده ۱۴/۴٪ بین روش فرکتالی عددی-اندازه‌ای و کریجینگ شاخص در عیار حد ۴ gr/t و حداقل آن ۰/۳٪ بین روش‌های فرکتالی عددی-اندازه‌ای و عیار-مساحت در عیار حد ۲ gr/t به وجود آمده است. دیگر تخمین‌ها بین این حدود قرار دارند. به کمک آمار توصیفی مشخص شده است که بین این مجموعه‌ها اختلاف معنی‌دار وجود ندارد.

شکل‌های ۷ و ۱۳ نشان‌دهنده همبستگی خوبی بین منحنی‌های عیار-تناژ است. حداقل اختلاف بین نتایج تخمین ذخیره محدوده غار صالح به روش‌های فرکتالی (شکل ۷-الف) ۲/۱٪ و حداکثر آن ۱۱/۶٪ هست. این اختلافات برای عیار متوسط محدوده در شکل ۷-ب بین ۰/۳٪ تا ۸/۶٪ در نوسان است. مطابق شکل ۱۳-الف حداقل اختلاف در تخمین ذخیره در روش‌های زمین آماری ۱/۱٪ و حداکثر آن ۱۴/۹٪ است. دامنه تغییرات در برآورد عیار متوسط محدوده با روش‌های زمین آماری (شکل ۱۳-ب) ۴/۸٪ تا ۷/۴٪ است؛ بنابراین به‌طورکلی از نظر میزان تغییرات در محاسبه ذخیره روش‌های فرکتالی و در محاسبه عیار متوسط روش‌های زمین آماری به هم نزدیک‌تر هستند.

در شکل ۱۴ کلیه منحنی‌های عیار-تناژ برای مقایسه نشان داده شده است. مطابق شکل بهترین هماهنگی در



شکل ۱۴- منحنی‌های عیار تناژ، منحنی‌های نزولی مربوط به تناژ و منحنی‌های صعودی مربوط به عیار متوسط است (خط ممتد: کریجینگ معمولی، خط چین: کریجینگ شاخص، نقطه چین: فرکتال عددی-اندازه‌ای و خط دو نقطه چین: فرکتال عیار-مساحت)

- محاسبه ذخیره بدون توجه به نوع توزیع داده‌ها و وزن کانسار
- امکان محاسبه ذخیره با شبکه اکتشافی نامنظم و با چگالی پایین (هر چند بالا بودن چگالی شبکه اکتشاف، باعث بالا رفتن دقت ذخیره محاسبه شده، خواهد شد)

با توجه به شرح محاسبات ذکر شده در مقاله، مهم‌ترین مزایا و معایب کار به روش‌های جدید فرکتالی به شرح زیر است:

- مزایا:
- عدم نیاز به حذف داده‌های خارج از ردیف

- [6] Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Wang, Y., Gong, Q. and Liu, H.; 2010; "Delineation and exploration of geochemical anomalies using fractal models in the Heging area, Yunnan Province, China", *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 105, pp. 95-105.
- [7] Afzel, P., Fadakar Alghalandis, Y., Moarelvand, P., Rashidnejad Omran, N. and Asadi Haroni, H.; 2012; "Application of power-spectrum fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zone in Kahang Cu porphyry deposit, central Iran", *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 112, pp. 131-138.
- [8] Shu-yun, X., Yong-guo, Y., Zheng-yu, B., Xian-zhong, K. and Xiao-long, L.; 2009; "Mineral resource analysis by parabolic fractals", *Mining Science and Technology*, Vol. 19, pp. 91-96.
- [9] Wang, Q., Deng, J., Zhao, J., Li, N. and Wan, L.; 2012; "The fractal relationship between orebody tonnage and thickness", *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 122, pp. 4-8.
- [10] Wang, Q.F., Wan, L., Zhang, Y., Zhao, J. and Liu, H.; 2011; "Number-average size model for geological systems and its application in economic geology", *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 18, pp. 447-454.
- [11] Wang, Q., Deng, J., Liu, H., Yang, L., Wan, L. and Zhang, R.; 2010; "Fractal models for ore reserve estimation", *Ore Geology Reviews*, Vol. 37, pp. 2-14.
- [12] Mandelbrot, B.B.; 1983; *the fractal geometry of the nature*, Freeman, New York, 468pp.
- [13] Wang, Q., Deng, J., Zhao, J., Liu, H., Wan, L. and Yang, L.; 2010; "Tonnage-cutoff model and average grade-cutoff model for a single ore deposit", *Ore Geology Reviews*, Vol. 38, pp. 113-120.
- [14] Wang, q., Deng, J., Liu, H., Yang, L., Wan, L. and Zhang R.; 2010; "Fractal models for estimating local reserves with different mineralization qualities and spatial variations", *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 37, pp. 2-14.
- [15] شرکت طلای زرمهر؛ (۱۳۸۳)؛ گزارش نهایی طرح اکتشافی کانسار طلای کوه زر تربت حیدریه، ۳۷۲ صفحه.
- [۱۶] مظلومی، علیرضا؛ کریم پور، محمد حسن؛ رسا، ایرج؛ رحیمی، بهنام؛ عابدینی، وثوقی؛ (۱۳۸۷)؛ "کانسار طلای کوه زر تربت حیدریه، مدل جدیدی از کانی سازی طلا"، *مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران*، سال شانزدهم، شماره ۳، ص ۳۶۳ تا ۳۷۶.
- [۱۷] حسنی پاک، علی اصغر؛ شرف الدین، محمد؛ (۱۳۸۰)؛ *تحلیل داده‌های اکتشافی*، انتشارات دانشگاه تهران.

- محاسبات ریاضی ساده‌تر
 - تفکیک ماده معدنی با توجه به ابعاد فرکتالی که نشان‌دهنده‌ی کیفیت کانی سازی فضایی متفاوت است؛ و تخمین ذخیره به تفکیک کیفیت‌های متفاوت در روش فرکتالی عیار-مساحت
 - امکان محاسبه ذخیره و عیار متوسط در هر مرحله اکتشافی و استخراجی کانسار
 - امکان برآورد عیار متوسط و ذخیره با تغییرات عیار حد در حداقل زمان ممکن
- معایب:
- عدم امکان برآورد ذخیره محلی
 - ثابت فرض کردن چگالی کانسار برای برآورد ذخیره (در صورت وجود تغییرات در چگالی، برای تخمین ذخیره به روش‌های فرکتالی بایستی کانسار را با توجه به مقادیر چگالی به بخش‌های جداگانه تفکیک و ذخیره هر بخش را مجزا برآورد نمود)
 - عدم امکان تلفیق داده‌ها در کانسارهای چند فلزی (همانند حالتی که در روش کوکریجینگ وجود دارد).

۹- مراجع

- [1] Tercan, A.E. and Akcan, E.; 2004; "Assessment of uncertainty associated with grade-tonnage curves using geostatistical simulation", *Institution of Mining and Metallurgy Transactions. Section A: Mining Technology*, Vol. 113, No. 2, pp. A129-A136.
- [2] Kentwell, D.J., Bloom, L.M. and Comber, G.A.; 1999; "Improvements in grade tonnage curve prediction via sequential Gaussian fractal simulation", *Mathematical Geology*, Vol. 31, No. 3, pp. 311-325.
- [3] Lopes, J.A., Rosas, C.F., Fernandes, J.B. and Vanzela, G.A.; 2011; "Risk quantification in grade-tonnage curves and resource categorization in a lateritic nickel deposit using geologically constrained joint conditional simulation", *Journal of Mining Science*, Vol. 47, No. 2, pp. 166-176.
- [4] Goodfellow, R., Consuegra, F.A., Dimitrakopoulos, R. and Lloyd, T.; 2012; "Quantifying multi-element and volumetric uncertainty, Coleman McCreeley deposit, Ontario", *Canada, Computers & Geosciences*, Vol. 42, pp. 71-78.
- [5] Li, C. j., Ma, T.H. and Shi, J.F.; 2003; "Application of a fractal method relating concentration and distances for separation of geochemical anomalies from background", *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 77, pp. 167-176.