

جداسازی زون‌های کانی‌سازی در کانسار مس پورفیری کهنک اصفهان با استفاده از روش نوین فرکتالی عیار حجم

پیمان افضل*

گروه مهندسی اکتشاف معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

احمد خاکزاد

گروه زمین‌شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پرویز معارف‌وند

گروه معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

نعمت‌الله رشیدنژاد عمران

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

هوشنگ اسدی‌هارونی

گروه معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

// : // :

چکیده

مقدمه: شناسایی زون‌های کانی‌سازی، به‌خصوص زون‌های سوپرژن و هیپوژن، در کانسارهای پورفیری، یکی از مهم‌ترین اهداف اکتشاف این کانسارهاست، زیرا این امر نقشی مهم در تعیین پتانسیل اقتصادی و بهره‌برداری این‌ها دارد. روش‌های سنتی مبتنی بر مطالعه دگرسانی‌ها و کانی‌های موجود در این زون‌ها، به‌دلیل اتکای صرف بر مطالعات پتروگرافی و مینرالوگرافی، در بسیاری موارد جوابگو نیستند. روش‌های جدیدتری که بر اساس مطالعه سیالات درگیر و ایزوتوپ‌ها بیوزونها شده، شواهدی غیرمستقیم بوده و بیشتر برای تفکیک دگرسانی‌ها به‌کار می‌روند. روش‌های فرکتالی، به‌دلایل بسیاری چون در نظر گرفتن توزیع فضایی داده‌ها و نیز شکل‌هندسی آنومالی‌ها، دارای کاربرد فراوانی در مطالعات سطحی زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی می‌باشند.

*عهده دار مکاتبات: peymanafzal@yahoo.com

هدف: در این پژوهش، روش فرکتالی عیار-حجم، به‌عنوان روشی نوین برای جداسازی زون‌های کانی‌سازی به‌خصوص سوپرژن و هیپوژن و سنگ‌دیواره، با تکیه بر عیار عنصر اصلی در کانسارهای پورفیری ارائه شده است.

روش بررسی: پس از بررسی اساس ریاضی این روش برای مدل‌سازی‌های فرکتالی و مولتی‌فرکتالی، روش عیار-حجم در کانسار مس پورفیری کهنک (در منطقه زفره استان اصفهان) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه نخست توزیع عنصر مس در این کانسار تخمین زده شده و نمودار لگاریتمی عیار-حجم رسم گردید و نقاط شکست نمایانگر مرزهای عیاری زون‌ها و مرز کانی‌سازی با سنگ دیواره مشخص شدند. هم‌زمان مدل‌های توزیع دگرسانی، کانی‌شناسی و زون‌بندی بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی نیز در کهنک ساخته شد و با نتایج حاصل از این روش مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج: در کانسار کهنک زون سوپرژن وجود دارد، درحالی‌که با روش‌های قبلی این زون ثبت نشده بود.
نتیجه‌گیری: زون‌های جداشده با کمک روش فرکتالی عیار-حجم علاوه بر همپوشانی با مدل‌های زمین‌شناسی به‌علت استفاده از عامل عیار که مهم‌ترین پارامتر مستقیم و کمی است، کارآمدتر از دیگر روش‌های جداسازی زون‌ها در شناخت اینگونه کانسارها است.

واژه‌های کلیدی: روش فرکتالی عیار-حجم، کانسار مس پورفیری، زون‌های کانی‌سازی، کهنک، اصفهان

مقدمه

از سال ۱۹۰۴ به‌این‌سو، مهم‌ترین منابع مس در دنیا کانسارهای پورفیری هستند. این کانسارها به‌دلیل ذخیره بسیار زیاد و وجود عناصر ارزشمند همراه چون مولیبدن و طلا اهمیت فراوانی دارند.^(۱،۲) در ایران نیز اکتشاف این کانسارها در سال‌های اخیر جزو اولویت‌ها قرار گرفته است. از جمله این کانسارها کانسار کهنک واقع در زفره استان اصفهان می‌باشد. این کانسار براساس مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی تقسیم شده است که مطالعات نشانگر وضعیت بهتر بخش‌های شرقی و مرکزی این کانسار بوده و مطالعات اکتشافی بیشتر در این دو بخش متمرکز شده است.^(۳،۴)

برای طراحی معدن و به‌خصوص کارخانه فرآوری و تنظیم خوراک ورودی به آن باید زون‌های گوناگون این کانسارها به‌خوبی مشخص باشند. به‌خصوص این‌که، زون سوپرژن و بعد از آن هیپوژن هدف‌های نخست استخراج هستند. به‌عبارتی تعیین درست مرز و موقعیت زون‌ها سبب یک برنامه‌ریزی تولید مناسب در بلندمدت برای استخراج کانسارهای پورفیری می‌شود که در طول زمان معدنکاری دچار تغییرات کمی خواهد شد. این مسایل نشانگر این امر است که تنها مدل‌کردن داده‌های زمین‌شناسی نمی‌تواند در جدایش درست زون‌ها موثر باشد و باید از روش‌های مبتنی بر عیار مس در این امر استفاده نمود. روش‌های سنتی جدایش زون‌ها در کانسارهای پورفیری مبتنی بر شناسایی کانی‌ها و دگرسانی‌ها می‌باشد که اساس این کار مطالعات پتروگرافی و مینرالوگرافی است. به‌عبارتی از شواهد مستقیم و کانی‌های شاخص برای جدایش زون‌ها استفاده می‌شود. از روش‌های معروف در این امر می‌توان به

مدلسازی توزیع آلتراسیون‌های گوناگون در یک کانسار پورفیری اشاره نمود. این روش‌ها نخست توسط لاول و گیلبرت^(۵) بیوزونها شدند و پس از آن‌ها دانشمندانی چون ملفوس، کاکس و سینگر مدل‌هایی را بیوزونها کردند.^(۱)،^(۵)

^(۶) اضافه‌شدن اطلاعات مکملی چون داده‌های حاصل از سیالات درگیر و نیز داده‌های ایزوتوپی در سال‌های اخیر سبب تکامل این مدل‌ها شده‌است. از مهم‌ترین این موارد بیوزونها مدل دگرسانی‌ها براساس داده‌های سیالات درگیر است که نخستین بار توسط اولریخ و همکاران در سال ۲۰۰۱ بر روی کانسار مس و طلای پورفیری باجودلا‌آلمبرا در آرژانتین صورت‌گرفت و نیز مدلسازی توزیع ایزوتوپ گوگرد ۳۴ توسط ویلسون و همکاران در سال ۲۰۰۷ در کانسار مس و طلای پورفیری کادای استرالیا و تلفیق نتایج آن با مدل دگرسانی‌ها بیوزونها گردید.^(۷)،^(۸) مشکل اساسی این مدل‌ها، عدم توجه کامل به عیار عنصر یا عناصر اصلی در کانسار پورفیری موردنظر یا عدم توجه مناسب به این موضوع است. مشکل دیگر این روش‌ها تغییرات در تیپ‌های گوناگون کانسارهای پورفیری است، چون این کانسارها در عین‌این‌که دارای مشخصات خاصی هستند، ولی در وضعیت سنگ‌شناسی، گسترش دگرسانی‌ها، سن و عمق تشکیل و به‌طورکلی پارامترهای زمین‌شناسی بسیارمتنوع می‌باشند. مطالعات صحرایی مغزه‌ها و نمونه‌ها نمی‌تواند دقت کافی داشته‌باشد زیرا وابسته به تجربه و سلیقه زمین‌شناس برداشت‌کننده مغزه‌ها می‌باشد. در این حالت، برای جدایش دقیق کانی‌ها و کانه‌ها و نیز تشخیص دگرسانی‌ها در هر نمونه باید به روش‌های پرهزینه‌ای چون آنالیز میکروپروب متوسل شد. یک مشکل دیگر این روش‌ها عدم‌استفاده از روش‌های تحلیلی و ریاضی در آن‌ها است، به‌گونه‌ای‌که پایه بیشتر این روش‌ها تنها عیارسنجی صرف عناصر و تعیین نسبت‌های عددی از عناصر یا اکسیدهای اصلی می‌باشد. به‌عبارتی نتایج این عیارسنجی‌ها مورد تجزیه و تحلیل ریاضی قرار نمی‌گیرد. ضمن‌این‌که داده‌های سیالات درگیر و ایزوتوپی شواهد غیرمستقیم بوده و تفسیر قاطعی براساس آن‌ها نمی‌توان بیوزونها داد.^(۹) به‌طورکلی، نقص اصلی این روش‌ها عدم‌توجه لازم به عیار عنصر اصلی (مس، مولیبدن، طلا یا تنگستن) در کانسارهای پورفیری است. هدف اصلی در این پژوهش بیوزونها روشی نوین برای جدایش زون‌های اکسیدان، سوپرژن و هیپوژن و سنگ دیواره در کانسارهای پورفیری بر پایه هندسه فرکتال و نیز تغییرات عیار عنصر اصلی در این کانسارها می‌باشد. هم‌چنین نتایج حاصله با مدل‌های زمین‌شناسی نیز مورد‌مقایسه قرار می‌گیرد.

در این مطالعه، نخست معرفی مختصری از روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال صورت‌گرفته و با توجه به این موضوع که می‌توان از سطح به حجم رسید، در مورد اصول ریاضی روش‌های فرکتالی و مولتی‌فرکتالی و نیز روش عیار-حجم بحث می‌گردد. نخست داده‌های حاصل از ۸ گمانه حفرشده در کانسار در یک پایگاه‌داده‌ها آماده‌سازی شده، سپس داده‌ها به نرم‌افزار RockWorks منتقل شده‌اند. در مرحله بعدی، مدل‌های سه‌بعدی بلوک‌بندی‌شده براساس زون‌بندی، کانی‌شناسی و دگرسانی در این کانسار ترسیم گشته‌است. سپس با واریوگرافی مس با استفاده از نتایج آنالیز حاصل از ۹۸۵ نمونه گرفته‌شده از مغزه‌های حفاری، جهت‌های ناهمسانگردی برای این عناصر و نیز میزان شعاع‌تاثیر و نیز اثرقطعه‌ای نشانگر خطا در این جهت‌ها با استفاده از نرم‌افزار Data Mine تعیین شده‌است. در مرحله بعدی با استفاده از نتایج حاصل از مجذورعکس‌فاصله ارزیابی عیار مس در کانسار کهننگ صورت پذیرفته‌است. در این مقاله توزیع عیار مس در زون‌ها، دگرسانی‌ها و کانی‌های شاخص موردبررسی قرار می‌گیرد. داده‌های حاصل از این تخمین با روش فرکتالی عیار-حجم مورد‌مطالعه قرارگرفته و ضمن‌این‌که صحت رابطه

ریاضی عیار- حجم در آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد، زون‌های سوپرژن، هیپوژن و اکسیدان و سنگ‌دیواره از یکدیگر جدا می‌شوند. در گام آخر نتایج حاصل با نتایج حاصل از داده‌های زمین‌شناسی مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال و روش عیار-حجم

باتوجه به این‌که هندسه اقلیدسی توانایی بیان بیشتر پیچیدگی‌های موجود در طبیعت را ندارد، دانشمندان به دنبال هندسه‌ای بودند که بتواند توصیفگر کلیه فرآیندهای موجود در طبیعت باشد.^(۱۰) در سال ۱۹۸۳ پروفیسور ماندلبروت فرانسوی برای نخستین بار هندسه فرکتال را به‌عنوان ابزاری مناسب برای این کار معرفی کرد. به گفته ایشان «هندسه فرکتال توصیفگر طبیعت است آن‌گونه که طبیعت اعمال می‌کند نه آن‌گونه که بشر می‌خواهد و این امتیاز بسیار بزرگی محسوب می‌شود.»^(۱۱) در هندسه فرکتال هر شکل و پیچیدگی‌های آن در قالب اعداد نشان داده می‌شوند، همان‌طور که در هندسه اقلیدسی مفهوم‌های زاویه، طول، مساحت و فضاها را یک‌بعدی تا سه‌بعدی به‌کار می‌روند. در هندسه فرکتال بعدهای فرکتالی وجود دارند که به‌طور معمول اعداد صحیح نیستند و بعدهای فرکتالی نامیده می‌شوند که برای بیان پیچیدگی یک شکل می‌توان از آن استفاده نمود. بر این اساس، در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ میلادی روش‌های گوناگون آنالیز فرکتالی همچون عیار-مساحت، عیار-فاصله، عیار-محیط و طیف‌توان بیوزون‌ها شدند که در میان آن‌ها روش عیار-مساحت در علوم زمین کاربردی بسیار یافته‌است.^(۱۰) حسن اساسی این روش‌ها استفاده از تمام داده‌ها بدون جرح و تعدیل آن‌ها، در نظر گرفتن توزیع فضایی داده‌ها و شکل هندسی مناطق گوناگون از نظر توزیع پارامتر مورد مطالعه می‌باشد.^(۱۲، ۱۳) روش عیار-مساحت - که توسط دکتر چنگ استاد دانشگاه کارلتون کانادا و همکارانش در سال ۱۹۹۴ بر روی داده‌های لیتوژئوشیمیایی کانسار پورفیری دکتر مایکل سوفورتز در بریتیش کلمبیای کانادا بیوزون‌ها شده - بر پایه تغییرات عیار و نیز مساحت دربرگیرنده آن و عیارهای بالاتر است.^(۱۲) نمودار لگاریتمی عیار در برابر مساحت تجمعی در نقاطی می‌شکند، یا به عبارتی تغییر شیب شدید می‌دهد که این نقاط نمایانگر تغییر از زمینه به آنومالی‌های درجه مختلف و به تبع آن تغییرات در شرایط زمین‌شناسی به‌خصوص کانی‌سازی است.^(۱۴، ۱۵)

مطالعات بعدی نشان داد که به‌طور کلی داده‌های ژئوشیمیایی رفتار مولتی فرکتالی یا چندفرکتالی دارند که این نشانگر میزان تغییرات در شرایط زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دگرسانی، هوازگی سطحی و کانی‌سازی و به دنبال آن مراحل غنی‌شدگی یک عنصر است.^(۱۶) با تطبیق این‌ها با داده‌ها و مشاهدات زمین‌شناسی صحت این مدلسازی‌ها به‌خوبی مشخص شده‌است.^(۱۷) هم‌چنین با مطالعاتی که ژو و همکاران در سال ۲۰۰۸ بر روی کانسار پورفیری مس Qulong واقع در تبت (غرب چین) انجام دادند، مشخص شد که توزیع عناصر در جهت عمودی نیز در کانسارهای پورفیری از مدل‌های فرکتالی تبعیت می‌کند.^(۱۸) یعنی در این کانسارها، جوامع ژئوشیمیایی عناصر هم در جهت افقی و هم در جهت عمودی با استفاده از روش‌های فرکتالی قابل تفکیک هستند. روش‌های فرکتالی که در دو بعد به‌خوبی جواب می‌دهند و گویای خیلی مسایل هستند، به‌یقین در سه بعد بسیار کارآمدتر هستند. با کمک این روش‌ها، می‌توان به‌خوبی جوامع شامل مناطق عمیق، مناطق با کانی‌سازی کم‌عیار و پرعیار را جدا نمود. اساس روش عیار-حجم بر این حقیقت استوار است که با افزایش عیار، میزان حجم دربرگیرنده آن عیار و عیارهای بالاتر از آن

کمتر می‌شود، یعنی رابطه معکوس باهم دارند. با ترسیم نمودار لگاریتمی عیار-حجم هر جا که شیب منحنی تغییر شدیدی نمود یعنی جامعه عوض شده‌است. این امر نشانگر تغییر شدید عیار است که تابع تغییر شرایط زمین‌شناسی و کانی‌زایی است می‌باشد.

مدلسازی‌های فرکتالی و مولتی‌فرکتالی مبتنی بر وجود یکسری روابط بین تابع توانی شاخص $M(\delta)$ و نیز پارامتر موردبررسی δ در منطقه مورد مطالعه است که این رابطه به صورت زیر است: (۱۹)

$$M(\delta) \propto \delta^{-\alpha} \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامتر α برابر بعد فرکتال در هر نقطه از نمودار لگاریتمی است که با توجه به طبیعت مولتی‌فرکتالی داده‌ها در علوم زمین مقادیر آن متفاوت است. تابع توانی شاخص $M(\delta)$ در رابطه (۱) می‌تواند برابر حجم دربرگیرنده عیار، مساحت یا محیط دربرگیرنده عیر یا هر شکل هندسی باشد که عیارهای خاصی (δ) را دربر می‌گیرد. چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۴ با استفاده از تابع تقسیم (partition function) به رابطه (۱) دست‌یافته و نشان دادند که می‌توان این رابطه را به صورت زیر بیان نمود: (۱۲)

$$A(\rho \leq v) \propto \rho^{-\alpha_1}; A(\rho \geq v) \propto \rho^{-\alpha_2} \quad (2)$$

در این رابطه A مساحت دربرگیرنده عیار ρ و نیز عیارهای بالاتر از آن است. هم‌چنین v برابر حد آستان‌های در منطقه مورد مطالعه است. پارامترهای α_1 و α_2 برابر بعد فرکتال در هر نقطه از نمودار لگاریتمی هستند. به‌طور خلاصه رابطه عیار-مساحت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A_{(>p)} \propto p^{-D} \quad (3)$$

که در این رابطه D نشانگر بعد فرکتال است. اساس سه رابطه (۱-۳) تابع تقسیم بیوزونها شده توسط اورتز و ماندلبروت در سال ۱۹۹۲ است که رابطه بین ابعاد یک سلول دوبعدی یا ریزبلوک (المان) سه‌بعدی را با تعداد آن‌ها و نیز پارامتر اندازه‌گیری شده در آن را بیان می‌کند. رابطه تابع تقسیم به صورت زیر است: (۲۰)

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i^q \quad (4)$$

در این رابطه χ_q تابع تقسیم، ε ابعاد ریزبلوک سه‌بعدی یا سلول دوبعدی یا به‌طور کلی المان مورد اندازه‌گیری، μ پارامتر موردسنجش در هر المان است. اگر مقدار اندازه‌گیری شده به خوبی طبیعت مولتی‌فرکتال از خود نشان دهد رابطه زیر برقرار می‌شود: (۱۲)

$$\chi_q(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\tau(q)} \quad (5)$$

در این رابطه تابع تقسیم متناسب با رابطه‌ای نمایی بین اندازه المان ε و نیز هر لحظه q است. در رابطه شماره ۵ $\tau(q)$ یک تابع کمکی است. به عبارتی با کمک این تابع درحالتی که در سه‌بعد مطالعه صورت می‌گیرد و با ریزبلوک‌ها سروکار داریم می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$V_{(>p)} \propto p^{-D} \quad (6)$$

که در این حالت V حجم دربرگیرنده عیارهای بزرگتر و مساوی p در کانسار مورد مطالعه و D بعد فرکتال است. به عبارتی می‌توان گفت که چون حجم تابعی از سطح است می‌توان از روند کلی اثبات رابطه عیار-مساحت

بیوزونهاشده توسط چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۴، برای اثبات روش عیار-حجم استفاده نمود که در مطالعه بر روی کانسار کهنگ برقراربودن این رابطه به خوبی ملاحظه خواهد شد.^(۱۲)

مشخصات عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه در حدود ۷۳ کیلومتری شمال شرق شهرستان اصفهان واقع شده است. این کانسار در حدود ۱۰ کیلومتری شرق روستای زفره قرار دارد. روستای کهنگ تنها روستای واقع در محدوده اکتشافی می‌باشد. کانسار کهنگ حداثی طول‌های جغرافیایی $۲۹^{\circ} ۴۲' ۵۲''$ تا $۲۵^{\circ} ۲۹' ۵۲''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $۴۴'$ تا $۵۴' ۳۲''$ شمالی واقع گشته است. بیشتر محدوده اکتشافی کوهستانی و در محدوده زون آلتراسیون بیشتر تپه ماهوری است. آب و هوای منطقه در زمستان سرد و در بقیه سال گرم و خشک می‌باشد.

نتایج و بحث

زمین شناسی کانسار

کانسار کهنگ بر روی کمربند ولکانیکی ارومیه - دختر واقع شده است، که از شمال غرب به سمت جنوب شرق ایران به طول و عرض تقریبی ۲۰۰۰ کیلومتر و ۵۰ کیلومتر کشیده شده است (نقشه ۱). این کمربند ولکانیکی در ارتباط با فرورانش صفحه اقیانوسی نئوتتیس و صفحه عربی به زیر ایران در زمان میوسن میانی (حدود ۱۳ میلیون سال پیش) تشکیل شده است.^(۲۱) کمربند ارومیه - دختر را سنگ‌های آذرین بیرونی با ترکیب میانه (به‌طورعمده آندزیتی) و به طور محلی توده‌های آذرین درونی (گرانیت، گرانودیوریت، کوارتز مونزونیت، دیوریت و تونالیت) و نیمه عمیق (بیشتر داسیت و آندزیت پورفیری) تشکیل داده اند. انواع درونی و نیمه عمیق دارای پتانسیل بالای تشکیل ذخایر مس پورفیری می‌باشند.^(۲۲) همان‌طوری که در نقشه ۱ نشان داده شد، تمامی ذخایر بزرگ پورفیری ایران نظیر سرچشمه، میدوک، دره‌زار و سونگون همانند منطقه کهنگ بر روی کمربند ارومیه-دختر واقع شده‌اند.



نقشه ۱- کمربند ولکانیکی ارومیه دختر و ذخایر بزرگ مس پورفیری موقعیت کانسار کهنگ (در مربع)^(۲۳)

این کانسار در گوشه شمال غربی برگه ۱:۲۵۰۰۰۰ اصفهان واقع شده است. در این منطقه سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی به میزان زیادی وجود دارد. این سنگ‌های بیشتر متعلق به زمان ترشیری بوده و توده‌های نفوذی بسیاری با ترکیب متوسط تا بازیگ در آن‌ها نفوذ نمودند.^(۲۲) در مناطق خاوری روستای زفره که کانسار کهنک نیز در آن واقع شده است، توده‌های نفوذی به سن نئوژن و با ترکیب گرانودیوریتی و مونزونیتی دیده می‌شود. هم‌چنین توده‌های توف برشی بخصوص توده‌های آندزیتی به سن ائوسن بالایی در این مناطق بسیار دیده می‌شوند. در مناطق نیسیان و شاه‌آباد توده‌هایی با ترکیب بین بازالت و آندزیت دیده می‌شوند. هم‌چنین در منتهی‌الیه بخش شمال‌خاوری برگه اصفهان (نزدیک محدوده کانساری) توده‌های داسیتی با میان‌لایه‌های آندزیتی دیده می‌شود. گدازه‌های آندزیتی فراوان نیز یکی از دیگر واحدهای آتشفشانی موجود در منطقه است. زمان تشکیل این توده‌های نفوذی ائوسن گزارش شده است. روند گسل‌های اصلی چون گسل ماربین-رنگان، گسل میلاجرد-زفره و نیز گسل برگوهر در این منطقه بیشتر شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و نیز خاوری-باختری است. سیستم گسلش در این منطقه زیر تاثیر گسل بزرگ قم-زفره می‌باشد که در ادامه گسل تبریز بوده و در ایجاد واحدهای آذرین بیرونی به سن ائوسن نقش اساسی داشته است.^(۲۳)

منطقه کهنک به‌طور عمده توسط سنگ‌های دیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری، مونزونیت و کوارتز مونزونیت پورفیری، مونزونیت و مونزودیوریت و هم‌ارزهای خروجی آن‌ها پوشیده شده است. گدازه‌های آندزیتی به سن ائوسن منطقه کانسار سازی را دربر گرفته است و جوانترین واحدهای موجود در منطقه کوارتز مونزونیت‌های به سن میوسن هستند. شواهد آلتراسیون در قسمتهای وسیعی از منطقه دیده می‌شود. رگه‌های کوارتزی و کوارتز مگنتیت در بخش شرقی رخنمونهای سنگی دیده می‌شود. دگرسانی‌های اصلی فیلیک، آرژیلیک درجه ضعیف تا متوسط، پتاسیک و پروپیلیتیک در منطقه وجود دارد. در این کانسار به خصوص در بخش‌های مرکزی و غربی ساختار حلقوی دگرسانی‌ها بخوبی دیده می‌شود. هم‌چنین دگرسانی‌های کوچکی از کانه‌های آهن‌دار، آلونیتی و کوارتز جاروسیت در این منطقه دیده می‌شوند. از دیدگاه کانی‌شناسی، مطالعات سطحی و عمقی نمایانگر حضور کانی‌های سولفیدی مس (کالکوپریت، کالکوسیت و کوولیت)، مالاکیت، اکسیدهای آهن بخصوص هماتیت و مگنتیت، مقادیر بالای پیریت، کات کبود (کالکانیت) و بصورت موضعی اسفالریت و پیرولولوزیت است.^(۲۴)

کانه‌زایی مس به‌طور عمده در دگرسانی فیلیک و در سنگ‌های مونزونیتی به‌وقوع پیوسته است.^(۴) با مطالعات صحرایی و دورسنجی، نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد نظر که در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ تهیه شده است (نقشه ۲). دو روند غالب شمال شرقی-جنوب غربی و شمال غربی-جنوب شرقی در گسل‌های منطقه دیده می‌شود. این سیستم پورفیری بسیار پیچیده است و در آن میزان زیادی کانی کات کبود یا سولفات مس آبدار دیده می‌شود. هم‌چنین در مغزه‌های حفاری گرفته شده دگرسانی پتاسیک و زون سوپرژن تشخیص داده نشده است. مجموع عمق حفاری در این گمانه‌ها برابر ۲۱۸۱/۵ متر بوده است که عمیق ترین گمانه دارای عمق ۴۰۰/۱ متر است. کانه کالکوسیت در سه گمانه از ۸ گمانه مشاهده شده است. این کانسار از نظر زمین‌شناسی و موقعیت قرارگیری به سه بخش شرقی، غربی و مرکزی بخش شده است که دو بخش شرقی و مرکزی آن به دلیل نتایج بهتر در مطالعات سطحی مورد نظر قرار گرفتند.

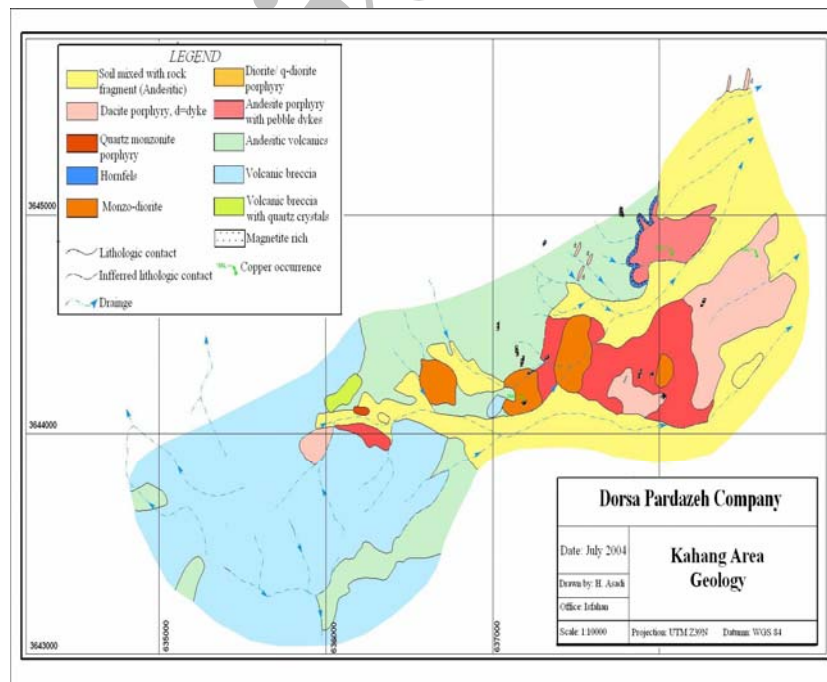
مطالعات نشانگر آن است که آب‌های جوی مس را از بعضی از واحدهای سنگی و دگرسانی‌ها شسته و احتمالاً زون سوپرژن را در عمق تشکیل داده‌است. (۳، ۲۵)

مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار

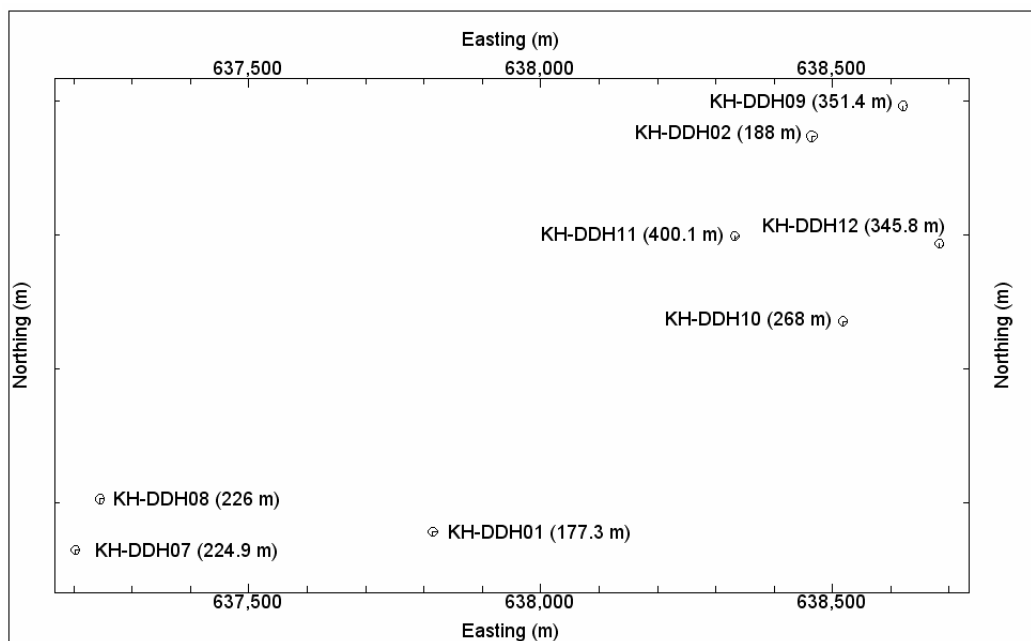
از دهه ۱۹۷۰ میلادی به بعد، بحث مدل‌سازی سه‌بعدی کانسارها، از دیدگاه‌های گوناگون اهمیتی ویژه در زمین‌شناسی و اکتشاف یافته‌است. به کمک این کار می‌توان به بهترین وجهی تغییرات شکل هندسی بخش‌های مختلف یک کانسار را مشاهده نمود. همچنین می‌توان مرزهای زمین‌شناسی بخش‌های گوناگون یک کانسار را در سه‌بعد مشخص و بخش‌های گوناگون یک کانسار را به تفکیک شناسایی نمود. این امر، برای ارزیابی عیار و در نهایت ذخیره کانسار به صورت درست و با کمترین خطا حیاتی و بسیار مهم است. امروزه این کار با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای چون Data Mine، RockWorks و Surpac صورت می‌پذیرد. در این نوشتار از نرم‌افزار RockWorks 2006 استفاده شده‌است. در این کانسار برای مدل‌سازی سه‌بعدی، مراحل زیر صورت پذیرفت:

- ۱- ساخت پایگاه داده‌ها و ورود آن به نرم‌افزار
- ۲- تعیین ابعاد پروژه و پلوک‌بندی
- ۳- تاثیر توپوگرافی با استفاده از داده‌های آن
- ۴- مدل‌سازی گمانه‌های حفاری
- ۵- مدل‌سازی کانسار برحسب زون‌بندی آن

در نقشه شماره ۳ محل قرارگیری گمانه‌ها آورده شده‌است. در کنار نام گمانه و در پرانتز عمق گمانه نیز آورده شده است.



نقشه ۲- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه (۲۳)



نقشه ۳ - نقشه موقعیت گمانه‌های اکتشافی در کانسار مورد مطالعه^(۳۳)

ساخت پایگاه داده‌ها و ورود آن به نرم‌افزار

برای ساخت پایگاه داده‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شده‌است. برای این کار در ابتدا مشخصات ۸ حلقه گمانه‌های حفر شده به تفکیک وارد نرم‌افزار و دسته‌بندی شده‌اند. پس از آماده‌سازی محتویات پایگاه به نرم‌افزار RockWorks2006 وارد گردیده‌اند. داده‌های وارد شده به شرح زیر می‌باشند:

۱. مختصات دهانه گمانه‌ها
۲. شیب و آزیموت گمانه‌ها
۳. ستون زون‌بندی گمانه‌ها (اکسیدان، سوپرژن و هیپوژن)
۴. ستون دگرسانی گمانه‌ها
۵. ستون کانی‌شناسی گمانه‌ها
۶. مشخصات نمونه‌های گرفته‌شده از مغزه‌های حفاری و نتایج آنالیزهای شیمیایی و فیزیکی آن‌ها

تعیین ابعاد پروژه و بلوک‌بندی

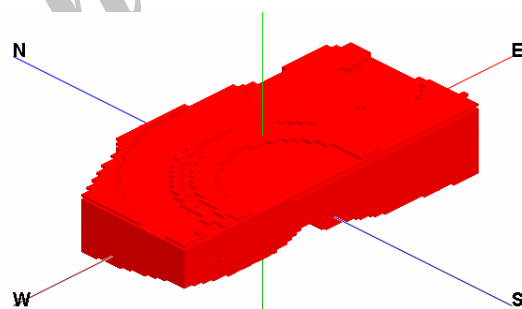
پس از وارد کردن داده‌ها، فضای مدلسازی در سه جهت شرقی - غربی (محور X)، شمالی - جنوبی (محور Y) و ارتفاع (محور Z) تعریف شده‌است. بر این اساس محدوده کانسار در جهت محور X از ۶۳۷،۲۰۰ تا ۶۳۷،۷۰۰، در جهت محور Y از ۳،۶۴۴،۱۰۰ تا ۳،۶۴۴،۸۰۰ و در جهت محور Z از افق ۲۴۲۰ متر تا افق ۱۹۵۰ متر تعریف شده‌است. پس از آن اندازه ریز بلوک‌ها با توجه به ابعاد شبکه حفاری، گستردگی و نوع کانسار در ابعاد ۱۰×۵۰×۵۰ متر در جهت‌های X، Y و Z معین شده‌است.

تاثیر توپوگرافی با استفاده از داده‌های آن

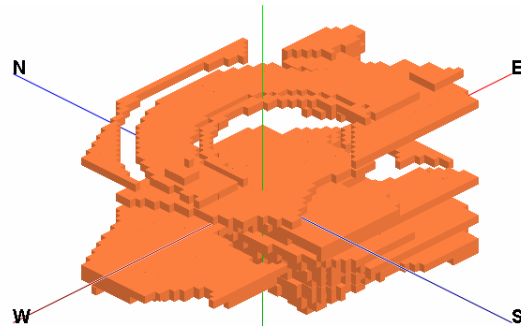
در کانسارهای بزرگ و گسترده باید تاثیر توپوگرافی زمین اعمال شود، زیرا در صورت عدم انجام این کار شکل سه‌بعدی بخش‌های مختلف کانسار بدون توجه به پستی و بلندی‌های زمین منطقه تهیه شده و شکل هندسی و اندازه آن‌ها غیرواقعی می‌شود. برای این کار از مختصات ۲۲۳۷۶ نقطه سطحی برداشتی جهت تهیه نقشه توپوگرافی منطقه استفاده شده است. پس از آن شبکه‌بندی جهت تعیین نقاط ارتفاعی در بخش‌های گوناگون محدوده کانسار صورت گرفته و نقشه توپوگرافی محدوده ترسیم شده است. در نهایت، شبکه‌بندی (Grid) حاصله در مدل‌سازی استفاده شده است.

مدل‌سازی کانسار برحسب زون‌بندی، دگرسانی‌ها و کانی‌شناسی

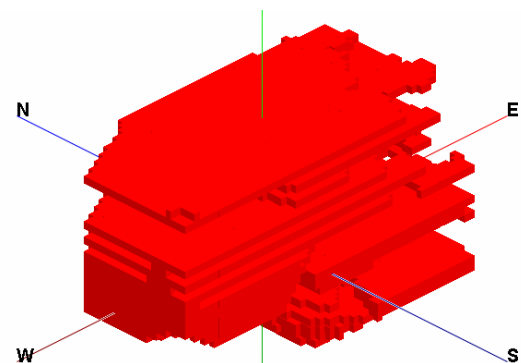
چون در کانسارهای پورفیری زون‌های اکسیدان، سوپرژن و هیپوژن دارای اهمیت اصلی هستند، هدف مدل‌سازی نیز ارزیابی عیار موادمعدنی در هر یک از این زون‌ها می‌باشد، پس مدل‌سازی این کانسار نخست برحسب این زون‌ها صورت پذیرفته است. مدل‌سازی زون‌ها نشانگر این امر است که در این کانسار تنها زون هیپوژن به میزان زیادی دیده می‌شود (نقشه ۴). زون اکسیدان نیز در بخش غربی محدوده منطبق بر توزیع کانی‌مالاکیت مشاهده شده است. با تلفیق این اطلاعات با مدل کانی‌شناسی مشخص شد که کانه غالب در این کانسار کالکوپیریت می‌باشد و کانه کالکوسیت به میزان بسیار کم در این کانسار وجود دارد (نقشه ۵). بر این اساس زمین‌شناسان در این کانسار زون سوپرژنی را تشخیص نداده و ثبت نکردند.^(۲۵) از طرفی مدل ساخته شده برای دگرسانی‌ها نشانگر وجود دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک درجه متوسط تا ضعیف در این کانسار است و دگرسانی پتاسیک در این کانسار مشاهده نشده است (نقشه ۶). یعنی دیگر دگرسانی میزبان در این کانسار از نوع آرژیلیک است. به عبارتی این مدل‌ها نشانگر خصوصیات منحصر به فرد این کانسار در ایران هستند و همین پیچیدگی‌ها بر تعیین درست زون‌ها تاثیرگذار می‌باشد.



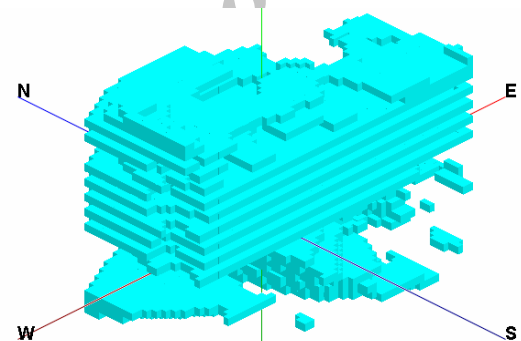
نقشه ۴- مدل سه‌بعدی زون هیپوژن در کانسار کهنک



نقشه ۵ - مدل سه بعدی توزیع کانه کالکوپیریت در کانسار کهنگ (سه برابر بزرگنمایی در جهت بعد Z)



نقشه ۶ - الف: مدل سه بعدی توزیع دگرسانی فیلیک در کانسار کهنگ (سه برابر بزرگنمایی در جهت بعد Z)



نقشه ۶ - ب: مدل سه بعدی توزیع دگرسانی آرتزلیک در کانسار کهنگ (سه برابر بزرگنمایی در جهت بعد Z)

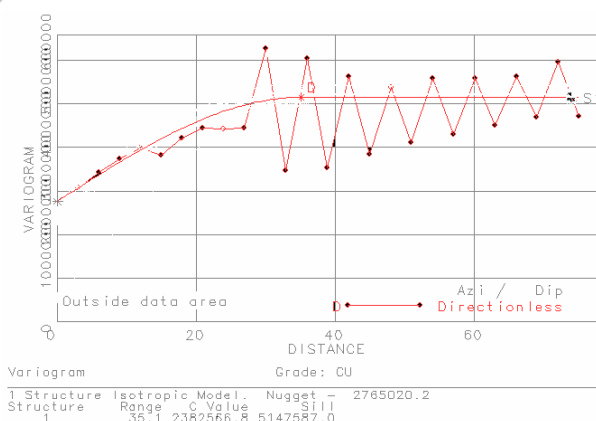
ساخت مدل توزیع عیار مس در این کانسار

در این مرحله با استفاده از داده‌های حاصل از ۹۸۵ نمونه گرفته شده از ۸ گمانه مدل توزیع عیار مس در این کانسار ساخته شده است. نخست هدف ساخت این مدل با استفاده از روش‌های زمین‌آماري کریجینگ بود و به همین جهت نخست واریوگرافی برای تعیین شعاع تاثیر و دیگر پارامترهای درگیر در این روش با استفاده از نرم افزار معتبر و نیرومند Data Mine صورت گرفت ولی به دلایل کمبود نمونه نسبت به وسعت کانسار و نیز فاصله بسیار زیاد گمانه‌های اکتشافی از یکدیگر واریوگرام مناسبی به دست نیامد (نقشه ۷). براساس واریوگرام ترسیم شده شعاع تاثیر نمونه‌ها بسیار کم و در حد ۳۵ متر و اثر قطعه‌ای بسیار بالاست که این امر به دلیل تعداد کم نمونه‌ها و حفاری‌ها در این کانسار می‌باشد. به همین جهت از روش مجذور عکس فاصله که روشی معتبر برای اینگونه موارد

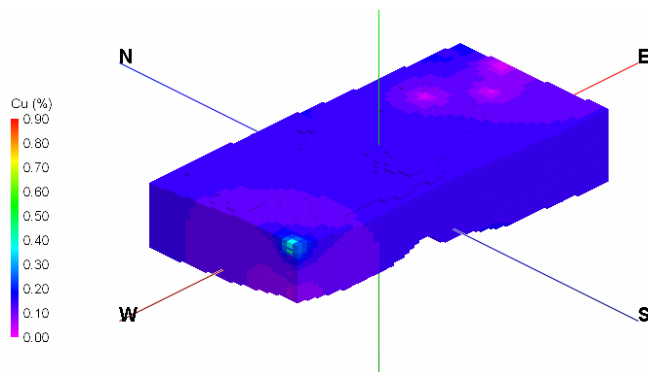
می‌باشد استفاده شد. این روش در حدفاصل زمین‌آمار و روش‌های سنتی و آمار کلاسیک است که دارای بسیاری خصوصیات زمین‌آمار می‌باشد. در این روش وزن اصلی برای تخمین فاصله نمونه‌ها از یکدیگر است. اگر به‌دلیلی مانند کم‌بودن تعداد نمونه‌ها، فاصله زیاد نمونه‌ها از یکدیگر، حالت نازک‌لایه ماده معدنی و... امکان استفاده از زمین‌آمار نباشد، این روش بهترین روش تخمین عیار می‌باشد.^(۲۶) این روش با استفاده از بحث‌های آماری قویتر شده و امکان تاثیر عیار تمام نقاط همسایه در برآورد عیار یک نقطه فراهم می‌آید (رابطه ۷). به این روش تعمیم یافته، روش وزنی مجذور عکس‌فاصله (IDS) می‌گویند. بر اساس این روش تاثیر عیارهای اطراف به نسبت مجذور عکس‌فاصله از مرکز بلوک تا آن عیارها تغییر می‌کند. بر اساس رابطه زیر g عیار مورد محاسبه، g_i عیار معلوم در فاصله d_i از نقطه مورد محاسبه می‌باشد.

$$g = \frac{\sum (g_i/d_i^2)}{\sum d_i^{-2}} \quad (7)$$

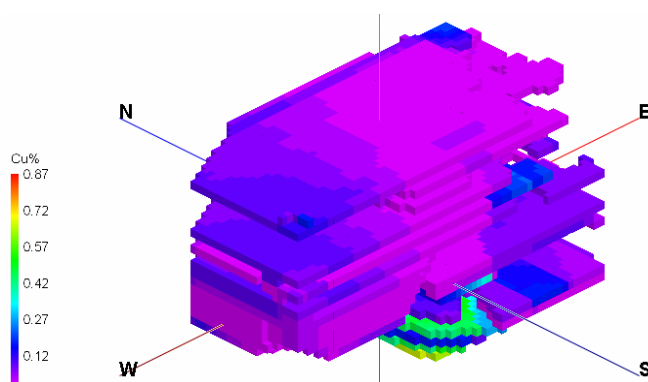
بر این اساس مدل توزیع عیار مس در این کانسار تهیه شده است (نقشه ۸). این مدل نشان می‌دهد که عیار عنصر مس به عنوان عنصر اصلی در بخش بزرگی از شرق و مرکز کانسار کمتر از ۰/۵ درصد است. این مدل با استفاده از عملگرهای ریاضی با مدل‌های زمین‌شناسی تلفیق شده است. تلفیق مدل عیاری با مدل‌های دگرسانی‌ها نشان می‌دهد که در بخش بزرگی از دگرسانی فیلیک و نیز دگرسانی آرژیلیک میزان عیار کمتر از ۰/۳ درصد می‌باشد که عیار بسیار پایینی است (نقشه ۹). هم‌چنین همین وضعیت در توزیع عیار مس در زون هیپوژن به‌دست آمده از داده‌های زمین‌شناسی نیز صدق می‌کند (نقشه ۱۰). همان‌گونه که در نقشه ۱۰ آورده شده بخش بزرگی از زون هیپوژن به‌دست آمده بر اساس روش‌های سنتی دارای عیار کمتر از ۰/۲ درصد و حتی در بخش مهمی دارای عیارهای کمتر از ۰/۰۱ درصد است. با توجه به این‌که شاخص اصلی زون هیپوژن وجود کانه کالکوپریت و حتی مقادیر کمتری بورنیت است به‌طور معمول عیار در بخش بزرگی از این زون باید بیش از این مقادیر باشد. این مدل‌ها نشانگر این امر است که داده‌های زمین‌شناسی با توزیع عیار در این کانسار مطابقت ندارند. به‌عبارتی زون‌ها باید بر اساس توزیع عیار نیز باید مورد مطالعه قرار گیرند.



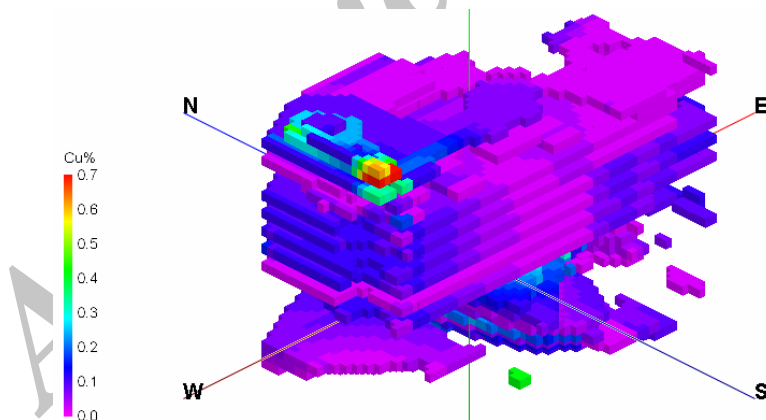
نقشه ۷ - واریوگرام شاخص عنصر مس در بخش‌های مرکزی و شرقی کانسار کهنک



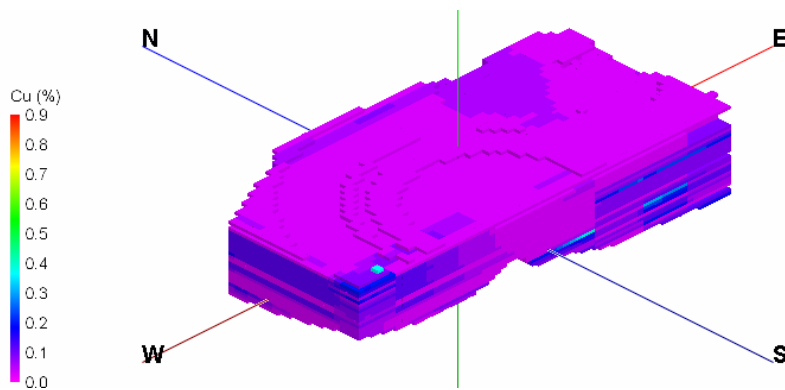
نقشه ۸ - مدل توزیع عیار مس در بخش‌های شرقی و مرکزی کانسار کهنگ



نقشه ۹ - الف: مدل سه‌بعدی توزیع عیار مس در دگرسانی فیلیک در کانسار کهنگ (سه برابر بزرگنمایی در جهت بعد Z)



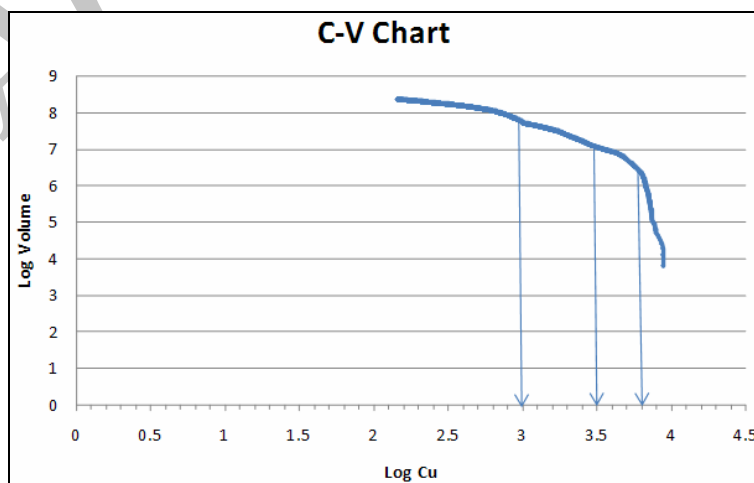
نقشه ۹ - ب: مدل سه‌بعدی توزیع عیار مس در دگرسانی آرژیلیک در کانسار کهنگ (سه برابر بزرگنمایی در جهت بعد Z)



نقشه ۱۰- مدل توزیع عیار مس در زون هیپوژن نخستین کانسار کهنگ

جدایش زون‌ها با استفاده از روش عیار-حجم

در این مرحله با استفاده از روش عیار-حجم، جوامع گوناگون و در حقیقت زون‌های گوناگون در کانسار کهنگ از یکدیگر جدا شدند. با توجه به این‌که، حجم هر ریزبلوک معلوم بوده و مقدار عیار مس برای هر یک محاسبه شده‌است، پس ترسیم منحنی لگاریتمی عیار-حجم برای هر عنصر کاری آسان می‌باشد. منحنی عیار-حجم مس به‌طور مشخص ۴ جامعه مجزا و سه نقطه شکست را نشان می‌دهد (نقشه ۱۱). این سه نقطه شکست، به ترتیب منطبق بر عیارهای ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۷ درصد مس می‌باشد. در نقطه آخر، که خطی با شیب تند به منحنی برازش شده‌است، پرعیارترین و غنی‌ترین جامعه عیاری قرار گرفته‌است که می‌توان گفت نشانگر زون سوپرژن است. بخش قبل از زون سوپرژن با عیارهای بین ۰/۳ تا ۰/۷ را می‌توان زون هیپوژن نام گذاشت، چرا که میزان تغییرات عیار در این زون با زون هیپوژن منطبق است. بخش بعدی با تغییرات عیار بین ۰/۱ تا ۰/۳ درصد، با عیار متوسط ۰/۲ درصد، می‌تواند نشانگر زون اکسیدان باشد که بر اساس مشاهدات میدانی پهنه کوچکی است. در نخستین جامعه از دست راست که شیب خط برازش شده بسیار کم و نزدیک به افق است می‌توان گفت که این جامعه نشانگر سنگ‌دیواره و منطقه‌ای است که کانی‌سازی اقتصادی در آن صورت نگرفته‌است. عیار این بخش کمتر از ۰/۱ درصد است.



نقشه ۱۱ - منحنی لگاریتمی عیار-حجم برای عنصر مس در کانسار کهنگ

همان‌گونه که در نقشه ۱۱ مشخص است براساس رابطه شماره ۶ بین عیار و حجم تجمعی دربرگیرنده آن رابطه توانی برقرار است. معادله خط برای جامعه آخر یا جامعه غنی شده سوپرژن با عیار ۰/۷ درصد به بالا به صورت زیر است:

$$Y = -16.949X + 70.807 \quad (۸)$$

چون X و Y به ترتیب برابر $\text{Log } \rho$ و $\text{Log } V(\geq \rho)$ می‌باشد پس رابطه شماره ۸ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Log } V(\geq \rho) = -16.949 \text{Log } \rho + 70.807 \quad (۹)$$

لازم به ذکر است که ρ برابر عیار و $V(\geq \rho)$ برابر حجم دربرگیرنده عیار و عیارهای بالاتر از آن است. براساس روابط ریاضی $\text{Log } x^a = a \text{Log } x$ و نیز $\text{Log}(xy) = \text{Log } x + \text{Log } y$ می‌توان رابطه ۹ را به صورت‌های زیر نوشت:

$$\text{Log } V(\geq \rho) = \text{Log } \rho^{-16.949} + \text{Log } 10^{70.807} \quad (۱۰)$$

$$\text{Log } V(\geq \rho) = \text{Log}(10^{70.807} \times \rho^{-16.949}) \quad (۱۱)$$

با گرفتن آنتی‌لگاریتم از طرفین رابطه ۱۲ نتیجه زیر که معادل رابطه شماره ۶ است به خوبی مشاهده می‌شود:

$$V(\geq \rho) = 10^{70.807} \times \rho^{-16.949} \quad (۱۲)$$

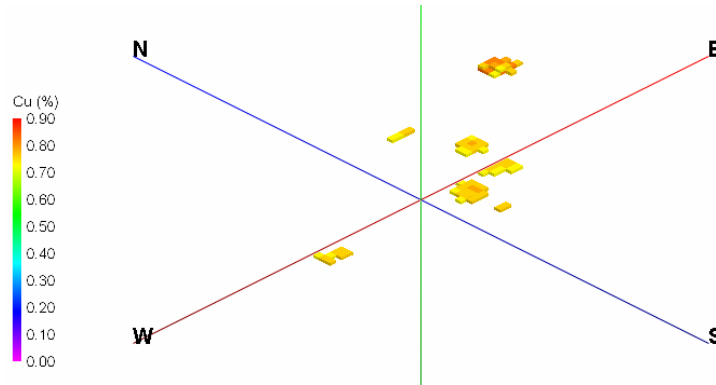
$$V(\geq \rho) = C \times \rho^{-D} \quad \text{یا}$$

برای زون هیپوژن (بین ۰/۳ تا ۰/۷ درصد) و سنگ دیواره (کمتر از ۰/۱ درصد) این معادلات به صورت روابط ۱۳ و ۱۴ برقرار است:

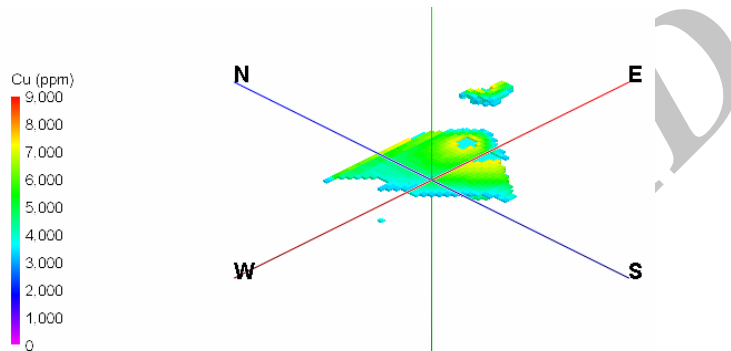
$$V(\geq \rho) = 10^{15.095} \times \rho^{-2.2764} \quad (۱۳)$$

$$V(\geq \rho) = 10^{9.0123} \times \rho^{-0.3424} \quad (۱۴)$$

پس از این‌که جوامع توسط این روش از یکدیگر جدا گردید، بر روی مدل بلوکی تخمین‌خورده نیز جدا شدند. پس از این امر، داده‌ها با مدل‌های زمین‌شناسی شامل مدل دگرسانی، کانی‌شناسی و به‌خصوص زون‌بندی به روش سنتی زمین‌شناسی مقایسه شدند. همان‌گونه که در نقشه شماره ۱۲ مشاهده می‌شود، روش عیار-حجم نشانگر وجود زون سوپرژن کوچکی در بخش‌های شرقی و مرکزی این کانسار است. با نگرش نوینی بر لاگینگ انجام‌شده قبلی مغزه‌ها و مطالعه مجدد آن‌ها، وجود کانه کالکوسیت در سه گمانه حداقل به اثبات رسید، درحالی‌که در مطالعات قبلی این کانه درست ثبت نشده بود. هم‌چنین محل قرارگیری این زون کوچک منطبق بر دگرسانی فیلیک بعنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های زمین‌شناسی این زون می‌باشد. یعنی زون سوپرژن در این کانسار وجود دارد، ولی با روش سنتی آن ثبت نشده است. هم‌چنین زون هیپوژن نسبت به حجم اولیه بسیار کوچک‌تر و معقول‌تر شده است (نقشه ۱۳). مطالعه به‌خوبی نشان می‌دهد که زون هیپوژن منطبق بر مناطق با میزان کالکوپیریت با عیار ۰/۳ درصد به بالا است (نقشه ۱۴). به عبارتی بخش عمده‌ای از مناطقی که به این زون نسبت داده شده بودند جزو سنگ دیواره با میزان بسیار اندک عیار مس یعنی کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد.



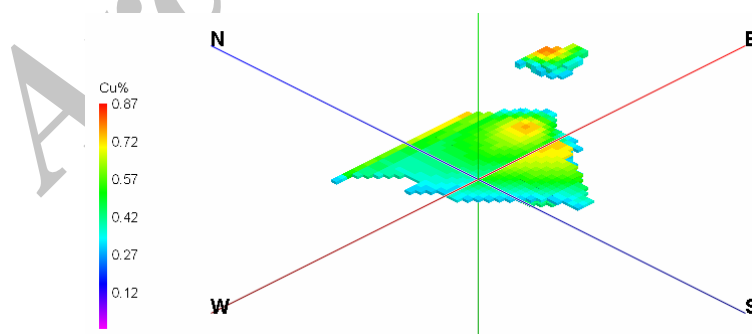
نقشه ۱۲- زون سوپرژن بدست‌آمده از روش فرکتالی عیار- حجم



نقشه ۱۳- زون هیپوژن بدست‌آمده از روش فرکتالی عیار- حجم

نتیجه‌گیری

مطالعات نشانگر این است که روش‌های فرکتالی نه تنها در سطح که در حجم و در مطالعات زیرسطحی نیز می‌توانند بسیار سودمند باشند. روش نوین عیار-حجم قابلیت جدایش زون‌ها را با توجه به عیار عنصر اصلی در کانسارهای پورفیری را دارد، به‌گونه‌ای که می‌توان به نتیجه‌ای نزدیک‌تر به واقعیت دست‌یافت، درحالی‌که در روش‌های سنتی ابهام زیادی وجود دارد.



نقشه ۱۴: مدل توزیع کالکوپیریت با عیار ۰/۳ درصد به بالا

دلیل ارجحیت عیار مس در این‌جاست که در زون سوپرژن کانه‌های کالکوسیت و کوولیت چون دارای عیار بالای مس هستند در زون سوپرژن عیار بسیار بالا می‌رود. روش‌های سنتی چون مبتنی بر مطالعات مستقیم پتروگرافی و مینرالوگرافی هستند پس بسیار وقت‌گیر و نیز هزینه‌بر هستند. هم‌چنین مطالعه به این روش‌ها دقت و

تجربه بالایی می‌طلبد چون در غیر این صورت می‌تواند سبب اغراق در مورد زون مورد نظر شود یا این‌که زونی از قلم بیفتد. روش‌های مبتنی بر سیالات درگیر و مطالعات ایزوتوپی چون روش‌هایی مبتنی بر شواهد غیرمستقیم هستند، نمی‌توان بر اساس آن‌ها نتایج قاطعی گرفت. در تمام این روش‌ها مشکل اصلی عدم توجه به عیار عنصر اصلی است. ضمن این‌که امروزه تحلیل‌های ریاضی نقشی اساسی در زمین‌شناسی یافته‌است، در حالی‌که در هیچ‌کدام از این روش‌ها از این تحلیل‌ها استفاده نمی‌شود. اما روش فرکتالی عیار-حجم با توجه به ماهیت هندسه فرکتال - که هندسه طبیعت است و می‌تواند جوامع طبیعی را به خوبی از یکدیگر جدا کند- و نیز در نظر گرفتن عیار عنصر اصلی و حجم دربرگیرنده آن، می‌تواند روشی جامع‌تر در جدایش زون‌ها از یکدیگر باشد. مطالعه در بخش‌های مرکزی و شرقی کانسار کهنک با روش عیار-حجم نشان داد که زون هیپوژن واقعی این کانسار دارای حجمی بسیار کوچک‌تر از زون به‌دست‌آمده از روش‌های سنتی بوده و تطابق زون به‌دست‌آمده از روش نوین با کالکوپیریت عیار بالا نیز این امر را تایید می‌نمایند. هم‌چنین روش‌های سنتی زون سوپرژنی در این کانسار نشان نداد ولی با کمک روش نوین فرکتالی عیار-حجم مشخص شد زون سوپرژن کوچکی در این کانسار با عیار $0/7$ درصد به بالا وجود دارد. وجود این زون با مطالعات مجدد روی لاگینگ مغزه‌ها بدلیل وجود کالکوسیت و نیز دگرسانی فیلدک اثبات شده‌است. یعنی اگرچه با روش سنتی زون سوپرژنی ثبت نشد، ولی با کم این روش می‌توان مناطق مشکوک به وجود سوپرژن را شناسایی و مجدد کنترل نمود. با کمک این روش زون سوپرژن در این کانسار به خوبی مورد شناسایی قرار گرفته‌است.

بر اساس پژوهش صورت گرفته در هر زون ارتباط بین عیار و حجم در برگیرنده آن را می‌توان به صورت تابعی توانی از این دو پارامتر و بعد فرکتال نوشت. یک حسن بسیار بزرگ دیگر این روش این است که بحثی به نام زون انتقالی بی‌معنی می‌شود. چون در روش‌های سنتی، اصل بر جدایش زون‌ها و دگرسانی‌ها با استفاده از کانه‌ها بود و اگر در نمونه‌ای دو یا چند کانه باهم دیده می‌شدند، امکان جدایش زون به صورت دقیق در آن امکان‌پذیر نبود و زون به صورت انتقالی معرفی می‌شد که با این روش، این مساله نیز حذف می‌شود. مرز کانی‌سازی با سنگ دیواره تهی از کانی‌سازی در این کانسار $0/1$ درصد به‌دست‌آمده است که رقمی معقول است. بر این اساس بخش بزرگی از زون هیپوژن در حقیقت جزو سنگ دربرگیرنده بسیار کم عیار یا عقیم می‌باشد. انطباق مناسب زون‌های جدا شده با مناطق با توزیع کانه‌ها متناظر برای زون مربوطه، به خصوص در زون سوپرژن و انطباق آن با توزیع کانه کالکوسیت نشانه دیگری از صحت روش فرکتالی عیار-حجم می‌باشد. به عبارتی می‌توان گفت نتایج حاصل از این روش معقول‌تر و نزدیک‌تر به حقیقت نسبت به روش‌های سنتی می‌باشد و می‌توان با استفاده از این روش میزان حجم واقعی زون‌ها را در کانسارهای گوناگون به خوبی تخمین زد.

References:

1. Cox, D. Singer, D., *Mineral deposits models*, U.S. Geological Survey bulletin, New York (1986).
2. Berger, Byron R., Ayuso, Robert A., Wynn, Jeffrey C., Seal, Robert R., *Preliminary Model of Porphyry Copper Deposits*, USGS, New York (2008).
3. Asadi Haroni, H., Tabatabaei, S. H., *proceeding of 14th symposium of society of Crystallography and Mineralogy of Iran*, Birjand University press, Iran (2006).

4. Hatami, S., Emami, S. N., Asadi Haroni, H., Emami, M. H., *proceeding of 3th Applied Geology and Environments*, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran (2007).
5. Lowell, J. D. & Guilbert, J. M., *Econ. Geo.*, **65**, 373 (1976).
6. Melfos V., Vavelidis M., Christo.des G., Seidel E., *Mineralium Dep.*, **37**, 648 (2002).
7. Ulrich, T., Gunther, D., Heinrich, C.A., *Economic Geo.*, **96**, 1743 (2001).
8. Wilson Alan, J., David, R., Cooke, Harper, Benjamin J., Deyell, Cari L., *Mineralium Deposita*, **42**, 465 (2007).
9. Asghari, O., *Thesis Ms: Minig Engineeirng*, Amirkabir university of technology, Tehran (2008).
10. Davis, John.C., *Statistics and data analysis in Geology*, John Wiley and Sons Inc., New York (2002).
11. Mandelbrot, B.B., *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, 158 (1983).
12. Cheng, Q., Agterberg, F. P., Ballantyne, S. B., *J. Geochem. Explor.*, **51**, 130 (1994).
13. Li, Changjiang, Ma, Tuhua, Shi, Junfa, *J. Geochem. Explor.*, **77**, 175 (2003).
14. Goncalves, M.A., *Mathematical Geology*, **33**, 61 (2001).
15. Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A., Good, D., *Com. Geosci.*, **22**, 507 (1996).
16. Goncalves, Mario A., Mateus, Antonio, Oliveira, Vitor, *J. Geochem. Explor.*, **72**, 114 (2001).
17. Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M., Albanese, S., *Appli. Geochem.*, **18**, 1865 (2003).
18. Zuo, Renguang, Cheng, Qiuming, Xia, Qinglin, *J. Geochem. Explor.*, **102**, 43 (2009).
19. Cheng, Q. & Li, Q., *Com. Geosci.*, **28**, 575 (2002).
20. Evertsz, C.J.G. & Mandelbrot, B.B., *Multifractal measures (appendix B) Chaos and Fractals*, Springer, New York (1992).
21. Alavi, M., *Tectonophys.*, **229**, 238 (1994).
22. Shahabpour, J., *Exploration and Mining Geo.*, **3**, 43 (1994).
23. KH. Tehrani, KH., *Geology of Iran*, Koleydar, Tehran (2005).
24. Afzal, P., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., Esfandiari, B., Fadakar Alghalandis, Y., *J. Geochem. Explor.*, **104**, 34 (2010).
25. Tabatabaei, S. H., Asadi Haroni, H., *proceeding of 25th Iranian symposium on geosciences*, Geological survey of Iran, Iran (2006).
26. Moon, Charles j., Whateley, Michael K.G., Evans, A.M., *Introduction to Mineral Exploration*, Blackwell, Oxford (2006).