

مدل سازی زمین آماری غیرمستقیم توزیع فضایی عیار طلا با استفاده از تلفیق داده های IP - RS و پاراژنهای سولفیدی همراه در محدوده یگانلی و قینرجه (زرشوران)

حمید ابادرفرد^۱، امید اصغری^{۲*}، غلامحسین نوروزی^۳، سجاد طالش حسینی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران؛ abazarfard.hamid@ut.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران؛ O.asghari@ut.ac.ir

۳- استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران؛ norouzih@ut.ac.ir

۴- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران؛ Sajjad.t.hosseini@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۵ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۰)

چکیده

این مطالعه به تشریح یک مدل سازی زمین آماری برای تخمین و شبیه سازی کانسار طلای محدوده یگانلی و قینرجه در یال جنوب غربی معدن زرشوران واقع در ۳۵ کیلومتری شهرستان تکاب استان آذربایجان غربی پردازد. با توجه به وجود چگالی بالا در مقادیر عنصر طلا، دقت در ارزیابی آن بسیار مهم بوده و تحقیقات مختلفی برای کاهش عدم قطعیت این عنصر انجام شده است. برای افزایش دقت مدل سازی، داده های گمانه اکتشافی (داده های سخت) و داده های ژئوفیزیکی (داده های نرم) به صورت ترکیبی استفاده شد. بدین منظور، داده های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی برداشت شده در منطقه مورد مطالعه به عنوان داده های نرم در الگوریتم روش مدل سازی به کار گرفته شده است. داده های ژئوفیزیکی شامل ۱۷ پروفیل موازی با طول حدود ۷۳۵ متر است. با توجه به توپوگرافی منطقه، برداشت پروفیل های ژئوفیزیکی با آرایه قطبی - دو قطبی و با فاصله الکترودی ۳۰ متر انجام شده است. جهت تأثیر داده های نرم در رویکرد مدل سازی، براساس نتایج وارون سازی داده های ژئوفیزیکی یک فاکتور ژئوفیزیکی به نام فاکتور سولفیدی ارائه شد. همچنین، براساس داده های حاصل از ۱۷ گمانه اکتشافی و پیاده سازی روش آنالیز مؤلفه های اصلی روی آن ها، یک فاکتور معرف کانی سازی به منظور تأثیر داده های سخت در رویکرد مدل سازی ارائه شد. در نهایت، جهت برقراری ارتباط بین داده های سخت و داده های نرم، از روش کوکریجینگ استفاده شد. مقایسه نتایج این رویکرد با نتایج مدل سازی کانسار طلا با استفاده از روش کوریجینگ معمولی حاکی از کاهش عدم قطعیت در مدل سازی است.

کلمات کلیدی

مدل سازی زمین آماری، کانسار طلای یگانلی و قینرجه، وارون سازی داده های ژئوفیزیکی، فاکتور سولفیدی، فاکتور معرف کانی سازی، کوکریجینگ.

۱- مقدمه

برای این منظور روش‌های مختلفی از قبیل آنالیز مؤلفه‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش با پیاده‌سازی روش‌های چند متغیره روی عناصر مؤثر در کانی‌سازی، فاکتور معرف کانی‌سازی تولید و مدل‌سازی زمین آماری روی آن انجام می‌شود [۱۱].

همچنین استفاده از داده‌های نرم در کنار داده‌های سخت حاصل از گمانه‌های اکتشافی می‌تواند افزایش دقت در بازتولید منحنی عیار عناصری مانند طلا داشته باشد. داده‌های نرم یا داده‌های ثانویه به‌طور معمول سبب مقابله با عدم پایداری و بهبود مدل‌سازی متغیر اولیه می‌شود [۱۳، ۱۲]. به‌عنوان یک مثال، در بررسی خصوصیات مخازن نفتی متغیر اولیه به‌طور معمول رخساره‌های زمین شناسی مشاهده شده در گمانه‌های اکتشافی به‌عنوان متغیر اولیه و برداشت‌های ژئوفیزیکی لرزه به عنوان داده نرم استفاده می‌شود [۱۴]. بنابراین داده‌های حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان بهترین داده‌های کمکی موجود شناخته می‌شوند [۱۳].

در این مطالعه به‌منظور بهبود فرایند مدل‌سازی کانسار طلای محدوده یگانگی و قینرجه در یال جنوب غربی معدن زرشوران از یک رویکرد توأم داده‌های سخت و داده‌های نرم استفاده شد. در ابتدا با بررسی داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی و پیاده‌سازی روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی روی آن‌ها یک فاکتور کانی‌سازی برای مدل‌سازی چند متغیره ارائه شد. سپس، با استفاده از داده‌های ژئوالکتریکی پلاریزاسیون القایی (بارپذیری) و مقاومت ویژه فاکتوری برداشت شده در منطقه مورد مطالعه، فاکتور ثانویه به نام فاکتور سولفیدی ایجاد شد. برای انجام این امر از روش‌های وارون‌سازی ژئوفیزیکی استفاده شد. در نهایت با استفاده از الگوریتم کوکریجینگ فاکتور معرف کانی‌سازی و فاکتور سولفیدی به‌صورت توأم برای مدل‌سازی کانسار طلا استفاده شد. برای بررسی عملکرد رویکرد ارائه شده، نتایج مدل‌سازی آن با نتایج مدل‌سازی رویکردهای قبلی از قبیل مدل‌سازی تک متغیره کانسار طلا و بدون در نظر گرفتن داده‌های نرم مقایسه شد. بنابراین هدف

مدل‌سازی زمین آماری فرایندی است که براساس داده‌های محدود از منطقه مورد مطالعه دید کاملی از وضعیت کانسارهای معدنی زیر سطحی ارائه می‌دهد [۱، ۲]. براساس این فرایند مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگر با مختصات مشخص مدل‌سازی خواهد شد [۱]. روش‌های تخمین و شبیه‌سازی زمین‌آماري در مطالعات زمین‌شناسی و مهندسی معدن بسیار مهم هستند. برای مثال، در مرحله پیش امکان‌سنجی کانسار مورد مطالعه، با استفاده از تخمین عیار متغیر مورد نظر در هر بلوک و بررسی بلوک‌ها با مقدار عیار بالاتر از سطح اقتصادی مورد نظر، اقتصادی بودن آن مشخص خواهد شد [۳، ۴]. برای دهه‌های مختلف کریجینگ به‌عنوان روشی مناسب برای تخمین زمین‌آماري استفاده شد. در این روش مقدار یک نقطه مجهول، براساس وزن‌دهی به نقاط معلوم اطراف آن مشخص می‌شود [۵]. در واقع کریجینگ به‌عنوان یک روش میانگین‌گیری متحرک وزن‌دار وابسته به فاصله نقاط موجود در اطراف یک نقطه مورد بررسی است [۶]. در دهه‌های اخیر، به دلیل از دست رفتن مقداری از واریانس واقعی داده‌ها و ایجاد اثر هموارسازی در روش کریجینگ، الگوریتم‌های مختلف شبیه‌سازی زمین‌آماري ارائه شد [۷، ۸]. روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماري با تولید مجموعه‌ای از مدل‌های ممکن از کانسار مورد مطالعه و از بین بردن اثر هموارسازی موجود در روش کریجینگ، واریانس داده‌های اولیه را بازتولید می‌کنند [۲]. در واقع، هدف مشترک تمام روش‌های زمین آماری بازتولید دقیق مقدار کمیت مورد بررسی با کاهش عدم قطعیت است. کانسار طلا یکی از چالش برانگیزترین کانسارهای مورد مطالعه در مدل‌سازی‌های زمین آماری است. وجود چولگی بالا در منحنی توزیع این عنصر، سبب ارائه رویکردهای مختلفی برای بهبود مدل آن شده است [۳، ۱۰-۸]. تحقیقات قبلی نشان داده‌اند که مدل‌سازی چندمتغیره کانسارهای معدنی سبب کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت در بازتولید منحنی عیاری نسبت به حالت عادی خواهد شد [۱۱].

سیستماتیک باشد و همچنین واریانس تخمین آن حداقل باشد [۶]. شرط اول سبب به‌وجود آمدن یک محدودیت می‌شود. براساس معادله (۲)، مجموع ضرایب کریجینگ باید معادل واحد باشد [برای جزئیات بیشتر به رفرنس ۵ مراجعه کنید].

$$\sum \lambda_i = 1 \quad (2)$$

برای بررسی شرط دوم در ابتدا تابع واریانس تخمین براساس معادله (۳) محاسبه می‌شود [۵]:

$$E[(Z_v - Z_v^*)^2] = E[Z_v^2] - 2\sigma[Z_v Z_v^*] + E[Z_v^{*2}] \quad (3)$$

سپس با بسط دادن و مینیمم کردن تابع واریانس، وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه‌های معلوم براساس معادله (۴) محاسبه می‌شود [۱۶، ۱۵]:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \dots & C_{1n} & 1 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \dots & C_{2n} & 1 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & \dots & C_{3n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n1} & C_{n2} & C_{n3} & \dots & C_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \dots \\ \lambda_n \\ -u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ C_{30} \\ \dots \\ C_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

۲-۲-۲- کوکریجینگ

دقت مدل‌سازی زمین‌آماری به عوامل مختلفی از جمله وجود کافی داده‌ها بستگی دارد [۴]. هزینه بالای نمونه‌برداری سبب می‌شود که در بعضی از موارد تعداد کمی از آنالیزهای یک عنصر نسبت سایر عناصر موجود در منطقه مورد مطالعه در اختیار باشد. همچنین به منظور کاهش هزینه‌ها، در بعضی از پروژه‌های معدنی تعداد کمی از گمانه‌های اکتشافی و یا داده‌های دو بعدی لیتوژئوشیمیایی در اختیار است. در این صورت مدل‌سازی عنصر مورد نظر با خطای زیادی همراه خواهد بود. با استفاده از ضریب همبستگی بین متغیرهای مختلف موجود، خطای ناشی از عدم وجود اطلاعات کافی در مدل‌سازی قابل جبران است [۱۱]. در واقع استفاده از یک متغیر کمکی یا ثانویه با اطلاعات کافی و با ضریب همبستگی مناسب با متغیر اولیه، سبب افزایش دقت در تخمین و شبیه‌سازی متغیر اصلی با اطلاعات ناکافی می‌شود [۱۱]. متغیر ثانویه می‌تواند از هم

اصلی این تحقیق مدل‌سازی زمین‌آماری غیرمستقیم عیار طلا با استفاده از داده‌های ژئوالکتریک و پارائزهای همراه آن است.

۲- روش‌شناسی

برای رسیدن به اهداف مورد نظر، در این مقاله از روش‌های مختلف آماری، زمین‌آماری و وارون‌سازی ژئوفیزیکی برای داده‌های سخت و نرم مورد مطالعه، استفاده شده است. برای مدل‌سازی کانسار طلا در رویکرد کلی در نظر گرفته شد. در رویکرد اول مدل‌سازی به‌صورت تک‌متغیره و با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی و شبیه‌سازی متوالی گوسی انجام شد. به‌عنوان رویکرد دوم، در ابتدا با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی یک فاکتور کانی‌سازی ارائه شد. سپس داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده به‌عنوان داده‌های نرم استفاده شد. بدین منظور از روش‌های وارون‌سازی دوجبری در راستای پروفیل (معمولاً X) و در راستای گسترش عمقی (Z) برای مقطع‌زنی استفاده شده است. پس از پیاده‌سازی روش‌های وارون‌سازی روی داده‌های ژئوفیزیکی ژئوالکتریک، یک فاکتور سولفیدی به‌عنوان داده‌های ثانویه در مدل‌سازی زمین‌آماری ارائه شد در نهایت، با استفاده از فاکتور کانی‌سازی، فاکتور سولفیدی و روش کریجینگ توأم یک مدل‌سازی توأم از کانسار طلای محدوده یگانگی و قینرجه تولید شد.

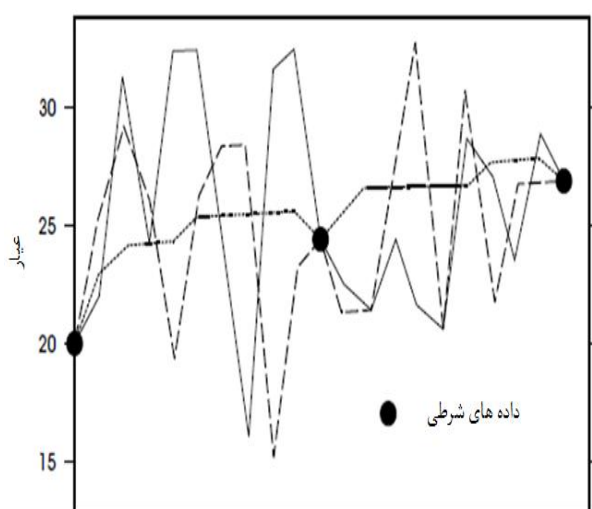
۲-۱- کریجینگ

کریجینگ به‌عنوان بهترین تخمین‌گر خطی نارایب، بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است [۵]. به‌عنوان یک مزیت، در روش کریجینگ به ازای هر تخمینی خطای مرتبط با آن را می‌توان محاسبه کرد [۴]. در نتیجه در این روش یک دامنه اطمینان برای مقدار تخمینی نقطه یا بلوک مورد نظر ارائه می‌شود. اگر متغیر مورد نظر $Z(x)$ باشد، مقدار تخمین در هر موقعیت دلخواه طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

که در آن λ_i وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه \bar{x} و Z^* عیار تخمینی است [۱۶]. تخمین‌گر کریجینگ بهترین تخمین‌گر نارایب است. بنابراین باید عاری از خطای

شکل ۱ نشان‌دهنده تفاوت بین شبیه‌سازی و کریجینگ با داده‌های واقعی در تخمین عیار کانسار است.



فاصله

شکل ۱- مقایسه عیار واقعی (خط پیوسته)، عیار شبیه‌سازی شده (خط منقطع) و عیار تخمین زده شده با کریجینگ (نقطه چین). تغییرات مشابه عیار واقعی و شبیه‌سازی شده با تغییرات هموار مقدار تخمین زده شده در تضاد است. همه نمودارها از میان داده‌های محاسبه شده عبور داده شده‌اند.

در مرحله طراحی یک معدن جدید یا طراحی بخش جدیدی از معدن در حال بهره‌برداری اغلب‌زایی محلی و کلی از ذخیره قابل بازیافت کافی نیست. برای مهندس معدن و همچنین متالورژیست‌ها و شیمیست‌ها اغلب پیش‌بینی تغییرپذیری ذخیره قابل بازیافت در مراحل مختلف فعالیت ضروری است. برای مثال روش‌های باربری و معدن‌کاری تا اندازه‌ای در ارتباط با پراکندگی مکانی خصوصیات متعدد نهشته است. برعکس آهنگ بازیافت پتانسیل منابع برجا تا اندازه‌ای در ارتباط با تکنولوژی معدن‌کاری خواهد بود. انتخاب تجهیزات معدن‌کاری یا روش برداشت از تولیدات معدنی در یک نهشته رسوبی تقریباً افقی می‌تواند در ارتباط با تغییرات روزانه ضخامت کانی‌زایی و روباره باشد [۲].

اگر حقیقت برجا کاملاً شناخته شده بود، با به کارگیری فرآیندهای شبیه‌سازی متعدد برای این حقیقت قادر به تصمیم‌گیری در مورد پراکندگی و روش‌های کاری مفید بودیم. متأسفانه دانش کامل از این حقیقت برجا در مراحل

جنس و یا متفاوت از متغیر اولیه باشد. برای مثال در تخمین عنصر طلا در یک منطقه، عنصر آرسنیک به‌عنوان متغیر ثانویه هم جنس با متغیر اولیه و یا داده‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان متغیر ثانویه متفاوت از متغیر اولیه، سبب افزایش دقت مدل‌سازی خواهند شد. تخمین یک متغیر با کمک گرفتن از متغیر دیگر و ضریب همبستگی بین این دو متغیر را کوکریجینگ می‌نامند [۱۶].

یک حالت دو متغیره را در نظر بگیرید که در آن می‌خواهیم مقدار Z^* را با استفاده از m متغیر اولیه شامل Z_1, \dots, Z_m و n متغیر ثانویه شامل Y_1, \dots, Y_n تخمین بزنیم. این تخمین را Z_{ck}^* می‌نامیم زیرا نشان‌دهنده آن است که این تخمین از محاسبه توسط کوکریجینگ حاصل شده است. در این حالت دو سری از اوزان $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ برای متغیر اولیه و k_1, \dots, k_n برای متغیر ثانویه برای تخمین کوکریجینگ باید محاسبه شود. بنابراین با توجه به معادله ۵ مقدار تخمینی به صورت زیر قابل محاسبه است [۴، ۵، ۱۱]:

$$Z_{ck}^* = \sum_{i=1}^m \lambda_i Z_i + \sum_{j=1}^n k_j Y_j \quad (5)$$

کوکریجینگ از کوواریانس بین متغیر اولیه (Z) و متغیر ثانویه (Y) استفاده می‌کند. اگر متغیر اولیه نسبت متغیر ثانویه به تعداد کمتری نمونه برداری شده باشد، امید آن می‌رود که از متغیر ثانویه به قدر کافی نمونه برداشته شده و کوواریانس بین دو متغیر به قدر کافی بالا باشد تا تخمین متغیر اولیه را بهبود ببخشد [۱۵].

۲-۳- شبیه‌سازی گوسی متوالی

کریجینگ توانایی تولید تخمین‌های ناریب از طریق مینیمم کردن واریانس تخمین را دارد. کاهش واریانس تخمین نسبت به واریانس اولیه سبب به وجود آمدن اثر هموارسازی در منحنی توزیع عیار حاصل از فرایند تخمین می‌شود [۷]. روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماري با تولید مجموعه‌ای از مدل‌های احتمالی از کانسار و جبران واریانس از بین رفته در اثر تخمین کریجینگ، اثر هموارسازی موجود را بر طرف می‌کند [۱].

خطی، مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند و دارای خواص زیر هستند [۱۹]:

- ۱- بخش اعظمی از تغییرپذیری می‌تواند به وسیله تعداد محدودی از متغیرهای جدید توجیه شود؛
- ۲- متغیرهای جدید که محصول ترکیب خطی هستند بین خودهمبستگی نشان نمی‌دهند (آزمون روش). در واقع در فضای p بعدی با استفاده از ابزار آنالیز مؤلفه‌های اصلی به دنبال دستیابی به دستگاه محورهای مختصاتی هستیم که بتواند با تعداد کمی بعد (متغیر جدید) بخش عمده تغییرپذیری را توجیه کند. از خصوصیات بالا می‌توان نتیجه گرفت که [۱۸]:

۱- اگر متغیرهای اولیه همبسته نباشند، PCA کاربرد ندارد. بنابراین توصیه می‌شود قبل از به‌کارگیری این روش به ماتریس همبستگی و نمودار پراکندگی داده‌ها توجه شود.

۲- اگر تعداد متغیرهای اولیه کم باشد (دو تا پنج متغیر)، می‌توان از ارقام موجود در ماتریس همبستگی و نمودارهای پراکندگی بین متغیرها جهت‌های تغییرپذیری حداقل و حداکثر را مشاهده کرد و نیازی به PCA نخواهد بود.

برای حذف همبستگی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ابتدا تجزیه‌برداری ماتریس واریانس-کواریانس براساس معادله (۶) صورت می‌گیرد [۲۰، ۲۱]:

$$B = Q^T \Lambda Q \quad (6)$$

که در آن، Λ ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه ماتریس کواریانس و Q ماتریس متعامد شامل بردارهای ویژه ماتریس کواریانس می‌باشد. فاکتورهای PCA براساس معادله (۷) تعیین می‌شوند [۲۰].

$$Y_{PCA}(u) = \Lambda^{-\frac{1}{2}} QZ(u) = AZ(u) \quad (7)$$

۲-۵- مدل‌سازی معکوس داده‌های ژئوالکترونیک

در مدل‌سازی معکوس ژئوفیزیکی، به دنبال یک مدل ایده-آل برای نمایش مقطعی از زمین هستند. این مدل، دسته‌ای از پارامترهای مدل را که دارای کمیت فیزیکی بوده و به وسیله

طراحی یک فعالیت در دست نیست. اغلب اطلاعات قابل استفاده در این مرحله بسیار جسته و گریخته و محدود به عیار تعدادی نمونه است و ارزیابی‌های استنتاج شده از این اطلاعات، دقت کمی برای محاسبات دقیق مورد نیاز دارد [۱۱].

تاکنون الگوریتم‌های مختلفی متناسب با اهداف مختلف شبیه‌سازی ارائه شده است [۲]. روش شبیه‌سازی گوسی متوالی یکی از پرکاربردترین و انعطاف‌پذیرترین الگوریتم‌های شبیه‌سازی است. شبیه‌سازی گوسی متوالی یک روش شبیه‌سازی مستقیم است که در مورد داده‌های پیوسته مانند عیار معدنی کاربرد دارد [۱۷]. الگوریتم این روش در ساده‌ترین بیان به این صورت است که در ابتدا با استفاده از اطلاعات موجود و موقعیت گمانه‌های اکتشافی یک مدل بلوکی از کانسار با بلوک‌های هم اندازه ساخته می‌شود. سپس با انتخاب یک مسیر تصادفی برای هر کدام از بلوک‌های موجود با استفاده از روش کریجینگ شاخص، یک تابع توزیع تجمعی تولید خواهد شد. با انتخاب تصادفی یک مقدار از این تابع توزیع و جمع کردن آن با مقدار تخمینی، بلوک مورد نظر شبیه‌سازی خواهد شد. این عملیات برای تمام بلوک‌های موجود در مدل بلوکی تکرار خواهد شد. بدین ترتیب یک تحقق از کانسار مورد مطالعه ایجاد خواهد شد. انتخاب مسیرهای تصادفی مختلف سبب به وجود آمدن تحقق‌های مختلفی از کانسار خواهد شد [۸، ۱].

۴-۲- آنالیز مؤلفه‌های اصلی

روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) یک روش آماری است که در آن از یک تبدیل متعامد برای تبدیل یک سری متغیر همبسته به یک سری متغیر غیر همبسته استفاده می‌شود [۱۱]. اگرچه این خصوصیت (کاهش تعداد بعدها یا متغیرها) برای یک فضای دوبعدی ممکن است چندان بااهمیت نباشد، اما در هنگام مطالعه یک فضای چند (بیش از دو) بعدی یا متغیره، چه از نظر نمایش اطلاعات و چه از جهت حجم محاسبات بسیار بااهمیت است. این روش تکنیکی است برای پیدا کردن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته که سبب ایجاد دستگاه مختصات جدید می‌شود [۱۸]. این ترکیب

داده‌های مشاهده شده برآورد می‌شوند را ارائه می‌دهد [۲۲]. پاسخ مدل داده‌های مصنوعی مربوط به پارامترهای مدل بوده که از روابط ریاضی حاکم بر مدل تولید می‌شود. همه روش‌های ریاضی در تلاش‌اند تا برآوردی از ساختارهای زیرسطحی داشته باشند که پاسخی نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده داشته باشند [۲۴-۲۲]. در روش‌های مبتنی بر سلول که در نرم افزارهای RES2DINV و RES3DINV استفاده می‌شود، پارامترهای مدل، مقادیر مقاومت سلول‌های مدل است. در حالی که داده‌های اندازه‌گیری شده، همان مقاومت ویژه ظاهری‌اند [۲۵]. ارتباط ریاضی بین پارامترهای مدل و پاسخ مدل برای مدل‌های دو بعدی و سه بعدی مقاومت، توسط روش تفاضل محدود [۲۶] یا اجزای محدود [۲۷] فراهم می‌شود. در همه روش‌های بهینه‌سازی، یک مدل اولیه شناخته شده در طی فرایندهای تکراری به گونه‌ای تعدیل می‌شود که تفاوت بین پاسخ مدل و مقادیر داده‌های مشاهده شده کم شود [۲۳].

۶-۲- فاکتور سولفیدی

در سال‌های اخیر روش‌های الکتریکی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی به‌طور ترکیبی و گسترده در اکتشاف کانسارهای سولفیدی و پورفیری استفاده می‌شوند [۲۸]. منظور از فاکتور سولفیدی به اصطلاح فاکتوری است که بتواند معرف شارژبلیته بالا و مقاومت ویژه پایین باشد. شارژبلیته بالا از این جهت که می‌تواند معرف زون‌های سولفیدی حاوی پیریت، آرسنوپیریت، کالکوپیریت و غیره باشد و از آنجا که کانی‌های فلزی مقاومت ویژه پایینی نیز از خود نشان می‌دهند این فاکتور می‌تواند معرف زون‌های کانی‌سازی باشد [۲۹]. البته در برخی از مناطق وجود رس در منطقه باعث ایجاد آنومالی‌های غیر واقعی می‌شود ولی با بررسی‌هایی که در منطقه زرشوران انجام شده است عدم وجود کانی‌های رسی یا به مقدار کمی گزارش شده است و به حدی نیست که باعث ایجاد آنومالی‌های غیر واقعی شود. فاکتور سولفیدی براساس معادله (۸) قابل محاسبه است:

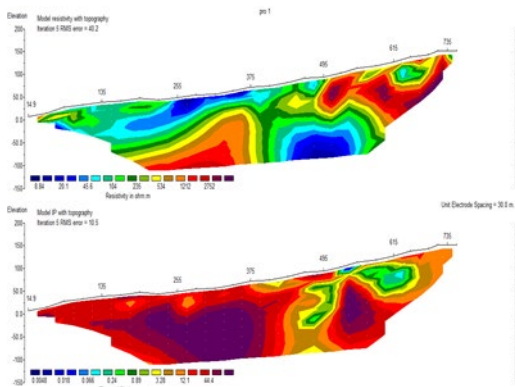
$$SF = \frac{2000 * M}{1,7 * \rho} \quad (8)$$

۳- مطالعات انجام شده روی داده‌ها

۱-۳- معرفی داده‌ها

در این مطالعه، یک مجموعه داده شامل ۲۹۸۸ نمونه جمع‌آوری شده از ۱۷ گمانه اکتشافی به‌عنوان داده‌های سخت استفاده شد (شکل ۲). نمونه‌های گمانه اکتشافی در طول گمانه‌ها و با فاصله یک متری از هم برداشت و تمامی نمونه‌ها تحت آنالیز ICP-OES قرار گرفته‌اند. علاوه بر آنالیز عیاری، اطلاعات سنگ‌شناسی در سراسر گمانه‌های اکتشافی برداشت شد. به دلیل فراوانی واحدهای سنگی آن دسته از واحدهای سنگی موجود در منطقه که نسبت به سایر واحدها دارای فراوانی و اهمیت بیشتری هستند، برای مدل‌سازی انتخاب شده‌اند. البته گمانه‌های بیشتری موجود است ولی با توجه به موقعیت قرارگیری پروفیل‌های اکتشافی به همین تعداد بسنده می‌شود. همچنین برای مدل‌سازی هم‌زمان عناصر مرتبط با کانی‌سازی در قالب فاکتور کانی‌سازی، چهار عنصر Au، As، S و Fe از بین تمامی عناصر انتخاب شده‌اند. انتخاب این عناصر بر طبق اطلاعات قبلی زمین‌شناسی بوده است. در کنار نمونه‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی، به‌عنوان متغیر ثانویه از داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده از منطقه مورد مطالعه استفاده شد. داده‌های ژئوالکتریکی توسط ۱۷ پروفیل موازی در امتداد شمال غرب به جنوب شرق و با طول کلی حدود ۷۳۵ متر در منطقه مورد مطالعه برداشت شدند (شکل ۲). فاصله بین پروفیل اول و دوم ۱۵۰ متر و فاصله بین سایر پروفیل‌ها ۱۰۰ متر و فاصله بین الکترودها ۳۰ متر در نظر گرفته شده‌اند. برداشت‌ها در راستای یک خط صاف برداشت شده‌اند. همچنین برداشت پروفیل‌های مشخص شده توسط آرایش مرسوم قطبی-دوقطبی انجام شده است. با توجه به آرایش برداشتی و اختلاف پتانسیل و فاصله الکترودها، مقدار پلاریزاسیون القایی (IP)، مقاومت ویژه (RS) و درنهایت فاکتور سولفیدی با فرمول

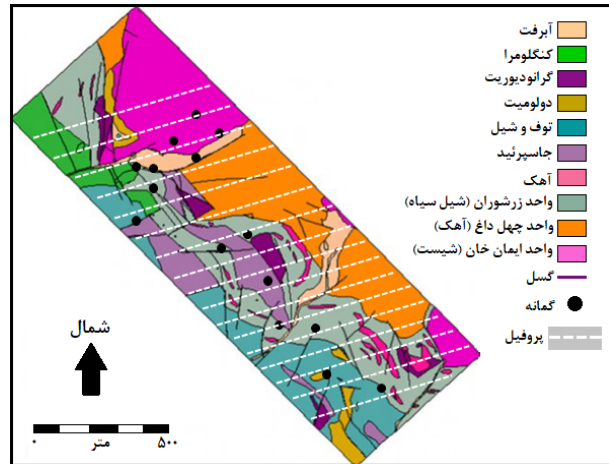
عملیات وارون سازی داده های ژئوالکتریکی برداشت شده توسط نرم افزار RES2DINV و با استفاده از روش حداقل مربعات انجام شد. این فرایند برای هر پروفیل به صورت جداگانه و با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی محل برداشت انجام شد. مدل دارای کمترین عدم انطباق بین داده محاسبه شده و مشاهده شده، برای هر کدام از پروفیل ها انتخاب شد. پروفیل شماره ۱ به عنوان نماینده پروفیل ها برای نشان دادن نتایج انتخاب شد (شکل ۴). در هر پروفیل مدل شده دو مقطع قابل مشاهده است که مقطع بالایی مربوط به مقاومت ویژه و مقطع پایینی مربوط به داده های بارپذیری است. در واقع تغییرات مقداری مقاومت ویژه و قطبش القایی در دو مقطع قابل مشاهده است. براساس مقطع حاصل شده از پروفیل ۱، کمترین و بیشترین مقدار مقاومت ویژه برای این پروفیل به ترتیب ۸/۸۴ و ۲۷۵۲ اهم متر و همچنین کمترین و بیشترین مقدار شارژبلیته برای این پروفیل به ترتیب ۰/۰۴۸ و ۴۴/۴ میلی-ثانیه مدل شده است. همان طور که برمی آید به دلیل پراکندگی مقادیر مقاومت ویژه و در نتیجه واریانس بالای آن، خطای ایجاد شده از مقادیر مقاومت ویژه بیشتر از پلاریزاسیون القایی است.



شکل ۴- مقطع دو بعدی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی مربوط به پروفیل ۱

چون واریانس داده های بارپذیری کمتر از داده های مقاومت ویژه است میزان خطای جذر میانگین مربعات ایجاد شده توسط وارون سازی داده های بارپذیری نیز کمتر است. براساس مقاطع حاصل از پروفیل یک، در عمق ۵۰ متری نسبت به سطح زمین

برای هر نقطه برداشت، مشخص شد. در فرمول $SF = \frac{2000 \cdot L}{\rho \cdot \rho}$ اخیر SF فاکتور سولفیدی، M بارپذیری و RS مقاومت ویژه است [۲۸-۲۹]. تعداد کل داده های ژئوفیزیکی برداشتی ۳۸۰۷ عدد است. پس از در نظر گرفتن ویرایش های مورد نیاز و حذف مقادیر خارج از ردیف و وارون سازی داده های برداشتی تعداد داده ها به ۳۱۵۰ عدد کاهش یافت.

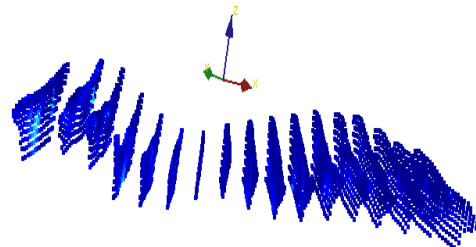


شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت

گمانه های اکتشافی و پروفیل های ژئوالکتریک

۳-۲- وارون سازی داده های ژئوفیزیکی

با توجه به توپوگرافی منطقه مورد مطالعه و موقعیت پروفیل های برداشتی، شکل ۳ نمایش سه بعدی ۳۱۵۰ عدد داده ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی را نشان می دهد. مطابق با شکل ۲، ۱۷ پروفیل دو بعدی با جهت شمال غربی-جنوب شرقی برای دریافت اطلاعات مرتبط به ویژگی های مقاومت ویژه و شارژبلیته مواد زیر سطحی طراحی شد.



شکل ۳- نمایش سه بعدی از پروفیل های طراحی شده جهت برداشت ژئوالکتریک

جدول ۱- نتایج حاصل از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی

۳-۳- آنالیز مؤلفه‌های اصلی

در این مرحله برای کاهش تعداد متغیرهای موردنظر و به‌دست آوردن فاکتور کانی‌سازی از روش چندمتغیره آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شده است. برای اعمال روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی از نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. بدین منظور ابتدا داده‌های منتقل شده به فضای نرمال به‌عنوان داده ورودی به نرم‌افزار وارد شده‌اند. استخراج مقادیر ویژه با استفاده از ماتریس همبستگی انجام شده است.

ابتدا آنالیز مؤلفه‌های اصلی روی کل داده‌ها انجام شد و در نهایت عیارهای اصلی استخراج و مجدداً آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام شد و برای محاسبات بعدی استفاده شد. با توجه به جدول ۱، متغیرهای طلا، کبالت، مس، آهن، سولفور، آنتیموان، بارپذیری و فاکتور سولفیدی (آخرین متغیر) در فاکتور اول دارای مقادیر بالایی هستند.

با توجه به همبستگی‌ها و کلاس‌های موجود و آنالیز مؤلفه‌ها طلا، آرسنیک و پلاریزاسیون‌القایی فاکتور کانی‌سازی (فاکتور ۴) را تشکیل می‌دهند. از طرفی فاکتور دو شامل مقاومت ویژه، پلاریزاسیون‌القایی، فاکتور سولفیدی و سولفور فاکتور ژئوفیزیکی را تشکیل می‌دهند. با این منظور از فاکتور سولفیدی استفاده شد که با توجه به آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام شده مقادیر فاکتور سولفیدی نشان‌دهنده پیریت و آرسنوپیریت (پیریت و آرسنوپیریت بیشترین طلا را با خود دارند) هستند و همچنین با توجه به آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام شده در فاکتور اول مقادیر بالاتری از مقاومت ویژه و بارپذیری دارند. به همین دلیل از فاکتور سولفیدی (نشان‌دهنده بارپذیری بالا و مقاومت ویژه پایین) برای محاسبات و تخمین عیار طلا استفاده شد. جدول ۲ مقادیر ویژه و واریانس هرکدام از مؤلفه‌ها را نشان می‌دهد. مؤلفه اول دارای بالاترین واریانس بین مؤلفه‌ها است که ۳۹/۱۰۸ درصد از کل تغییرپذیری را توجیه می‌کند. همچنین اوزان متغیرها در هرکدام از مؤلفه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

و در فاصله‌ی ۱۳۵ تا ۴۰۰ متری از این پروفیل مقدار مقاومت ویژه و شارژبلیته بالا است. با توجه به اطلاعات سنگ‌شناسی گمانه‌ها و عدم وجود رس در منطقه مورد مطالعه، می‌توان این محدوده از پروفیل یک را می‌توان به عنوان توده‌ی سولفیدی غیر فلزی طلا دار (رالگار و اورپیمت و غیره) معرفی کرد. همچنین در فاصله ۴۰۰ تا ۶۰۰ متری از پروفیل مورد مطالعه مقدار کم مقاومت ویژه و مقدار بالای شارژبلیته قابل مشاهده است. این موضوع که در مقاطع دیگر نیز مشاهد شده است معرف فاکتور سولفیدی خواهد بود.

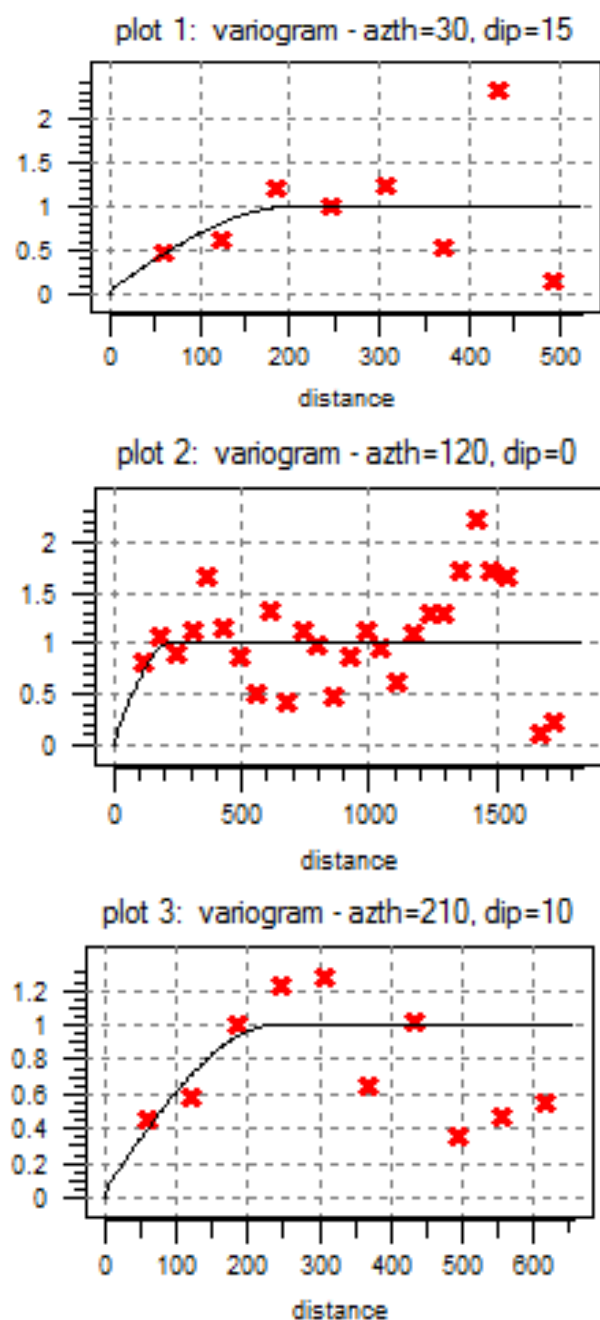
ب) آنالیز مؤلفه‌های اصلی بعد از چرخش محورها

| متغیر | مؤلفه‌ها | | | |
|-------|----------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Ag | .861 | -.006 | .029 | -.079 |
| As | .192 | -.013 | .107 | .700 |
| Au | .190 | -.014 | .165 | .767 |
| Co | -.082 | .111 | .850 | .172 |
| Cu | .227 | .069 | .849 | .183 |
| Fe | .079 | .237 | .886 | .036 |
| Pb | .908 | .006 | .062 | .063 |
| S | .005 | .816 | .229 | .007 |
| Sb | .770 | .310 | .089 | .310 |
| Zn | .688 | -.157 | .079 | .410 |
| ipest | -.167 | .478 | .112 | .707 |
| roest | -.113 | -.918 | -.094 | .102 |
| sfest | -.016 | .934 | .089 | .258 |

الف) آنالیز مؤلفه‌های اصلی قبل از چرخش محورها

| متغیر | مؤلفه‌ها | | | |
|-------|----------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Ag | .380 | .651 | -.286 | -.313 |
| As | .457 | .223 | .171 | .500 |
| Au | .517 | .221 | .228 | .533 |
| Co | .549 | -.247 | .604 | -.209 |
| Cu | .675 | .018 | .525 | -.281 |
| Fe | .650 | -.222 | .473 | -.391 |
| Pb | .490 | .692 | -.255 | -.220 |
| S | .571 | -.527 | -.308 | -.140 |
| Sb | .717 | .427 | -.310 | .001 |
| Zn | .465 | .662 | .002 | .138 |
| ipest | .561 | -.351 | .015 | .575 |
| roest | -.556 | .498 | .524 | .209 |
| sfest | .665 | -.562 | -.414 | .135 |

متوالی، برای تولید مدل مرتبط با فاکتور کانی سازی، امتیازات به دست آمده از مؤلفه دوم برای تعیین ساختار ناهمسانگردی واریوگرافی شده اند (شکل ۵). سه جهت اصلی، فرعی و قائم بیضی گون ناهمسانگردی با توجه به مقدار دامنه، به ترتیب در آزمون ۱۲۰ درجه و شیب ۰ درجه، آزمون ۳۰ درجه و شیب ۱۵ درجه، آزمون ۲۱۰ درجه و شیب ۱۰ درجه است.



شکل ۵- واریوگرام های جهتی مؤلفه کانی سازی (۱) آزمون ۳۰ و شیب ۱۵ (۲) آزمون ۱۲۰ و شیب ۰ (۳) آزمون ۲۱۰ و شیب ۱۰

جدول ۲- مقدار ویژه و واریانس هر مؤلفه

| مؤلفه ها | مقدار ویژه | درصد واریانس | درصد جمعیتی |
|----------|------------|--------------|-------------|
| ۱ | ۳/۱۲۹ | ۳۹/۱۰۸ | ۳۹/۱۰۸ |
| ۲ | ۱/۹۰۹ | ۲۳/۸۶۳ | ۶۲/۹۷۱ |

جدول ۳- اوزان متغیرها در هر دو مؤلفه تولید شده

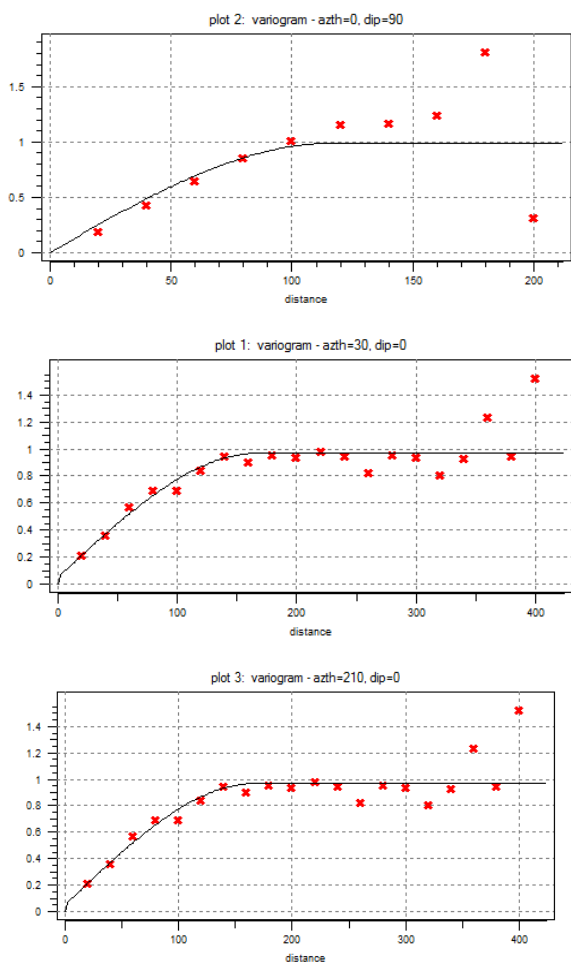
مؤلفه ها بعد از چرخش محورها

| متغیرها | مؤلفه ها | |
|-----------|----------|-------|
| | 1 | 2 |
| As_normal | .000 | .838 |
| Au_normal | -.082 | .761 |
| Cu_normal | .165 | .710 |
| Fe_normal | .513 | .518 |
| S_normal | .787 | .233 |
| ipesttt | .669 | -.180 |
| roesttt | -.780 | -.144 |
| sfest | .950 | -.002 |

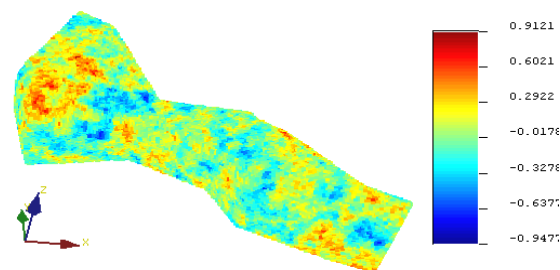
۴-۳- شبیه سازی فاکتور کانی سازی و سولفیدی

برای بررسی عملکرد رویکرد ارائه شده در این مقاله، لازم است که نتایج آن با رویکردهای مختلف مقایسه شود. یکی از این رویکردها، شبیه سازی فاکتور کانی سازی به دست آمده توسط روش آنالیز مؤلفه های اصلی و فاکتور سولفیدی به دست آمده توسط وارون سازی داده های ژئوفیزیکی به صورت جداگانه است.

با توجه به جدول اوزان متغیرها (جدول ۳)، به دلیل وجود مقادیر همبستگی مثبت بین متغیرها در مؤلفه دوم، این مؤلفه به عنوان فاکتور مرتبط با کانی سازی تفسیر شده و جهت شبیه سازی همزمان عناصر مرتبط با کانی سازی مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به الگوریتم روش شبیه سازی گوسی



شکل ۷- واریوگرافی جهتی فاکتور سولفیدی در (۱) آزیموت ۳۰ و شیب ۰، (۲) آزیموت ۰ و شیب ۹۰، (۳) آزیموت ۲۱۰ و شیب ۰

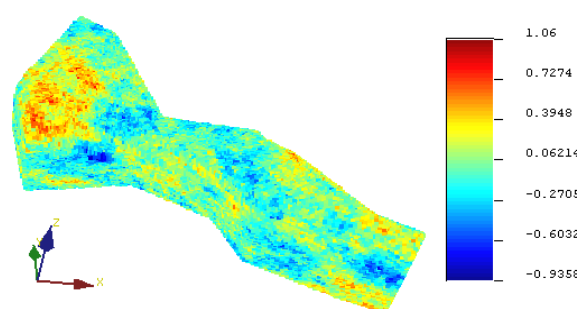


شکل ۸- نقشه میانگین شبیه‌سازی فاکتور سولفیدی نرمال درون مدل بلوکی

۵-۳- مدل‌سازی تک متغیره طلا

در این مرحله همانند مطالعات انجام شده در بخش قبلی، عنصر طلا برای مقایسه و اعتبار سنجی نتایج رویکرد مدل‌سازی توأم فاکتور کانی‌سازی به‌دست آمده توسط روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (داده سخت) و فاکتور سولفیدی به‌دست آمده

قبل از انجام شبیه‌سازی، مدل بلوکی کانسار به‌عنوان شبکه‌ای که شبیه‌سازی در آن انجام می‌شود ساخته شده است. براساس اطلاعات حاصل از معدن، ابعاد بلوک‌های موجود در مدل بلوکی ساخته شده $10 \times 10 \times 10$ متر مکعب در نظر گرفته شده‌اند. شبیه‌سازی مؤلفه کانی‌سازی در فضای نرمال با توجه به واریوگرافی داده‌ها در ۲۰ تحقق و به روش شبیه‌سازی متوالی گوسی انجام شد که میانگین مقادیر ۲۰ شبیه‌سازی در هر بلوک محاسبه شده و به‌عنوان مدل نهایی (نقشه نهایی) ارائه شده است (شکل ۶).

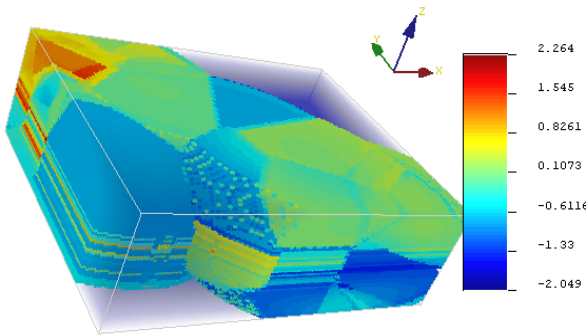


شکل ۶- نقشه میانگین شبیه‌سازی فاکتور کانی‌سازی

برای شبیه‌سازی فاکتور سولفیدی حاصل از نتایج وارون‌سازی داده‌های ژئوالکتریکی، در ابتدا لازم است تا ساختار ناهمسانگردی آن توسط ۳۱۵۰ داده برداشت شده از مقاطع وارون‌سازی بررسی شد. برای این منظور واریوگرافی فاکتور سولفیدی در آزیموت و شیب‌های مختلف ترسیم شد. سه جهت بیضیگون ناهمسانگردی با توجه به مقدار دامنه، در آزیموت ۳۰ و شیب ۰ درجه، آزیموت ۰ و شیب ۲۱۰ درجه و آزیموت ۰ و شیب ۹۰ درجه است (شکل ۷).

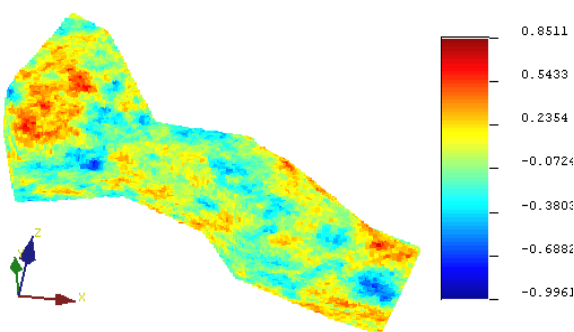
فاکتور سولفیدی در فضای نرمال با توجه به واریوگرافی داده‌ها و با استفاده از الگوریتم روش شبیه‌سازی گوسی متوالی، در ۲۰ تحقق شبیه‌سازی شده‌است. به‌منظور شبیه‌سازی فاکتور سولفیدی از مدل بلوکی ساخته شده در مرحله قبل استفاده شد. میانگین ۲۰ شبیه‌سازی در هر بلوک محاسبه شده و به‌عنوان مدل نهایی (نقشه نهایی) ارائه شده است (شکل ۸). براساس شکل ۸، مناطق قرمز رنگ سولفید بالا و مناطق آبی رنگ سولفید پایین را نشان می‌دهند.

در مرحله بعد، با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌های واریوگرام‌های جهتی، به منظور ادامه مسیر شبیه‌سازی، بلوک‌های مربوط به مدل بلوکی با استفاده از کریجینگ معمولی تخمین زده شده‌اند (شکل ۱۰).



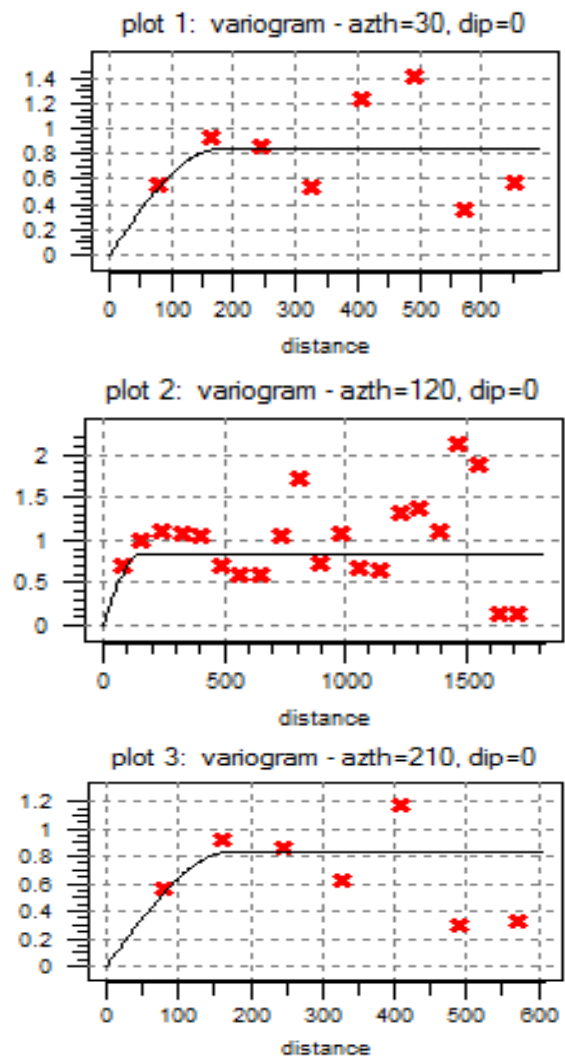
شکل ۱۰- نقشه مقادیر تخمین‌شده طلای تک متغیره حاصل از گمانه‌ها در فضای نرمال

در نهایت، شبیه‌سازی تک‌متغیره عنصر طلا در فضای نرمال با توجه به واریوگرافی انجام شده در شکل ۸، در ۲۰ تحقق و با استفاده از الگوریتم روش شبیه‌سازی گوسی متوالی انجام شد. همچنین میانگین مقادیر ۲۰ شبیه‌سازی در هر بلوک محاسبه و به‌عنوان مدل نهایی (نقشه نهایی) ارائه شده است (شکل ۱۱). براساس شکل ۱۱، مناطق نشان‌دهنده آنومالی عنصر طلا (قسمت‌های قرمز رنگ) در غربی‌ترین و شرقی‌ترین قسمت از مدل بلوکی قابل مشاهده است. پس از تولید مدل میانگین عنصر طلا، لازم است تا این مدل به فضای قبل از نرمال‌سازی برگردانده شود (شکل ۱۲).



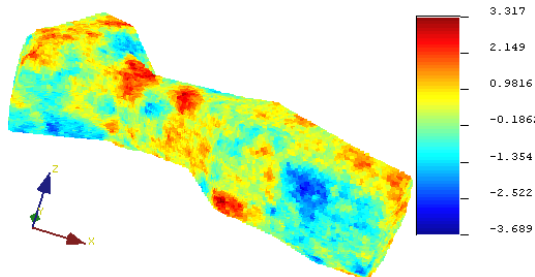
شکل ۱۱- نقشه میانگین شبیه‌سازی تک متغیره عنصر طلا در فضای نرمال

توسط وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (داده نرم) و همچنین بررسی روابط بین کانی‌سازی طلا با واحدهای سنگی و آلتراسیون‌ها، به‌صورت تک‌متغیره مدل شده است. برای شبیه‌سازی عنصر طلا از داده‌های تبدیل یافته به فضای نرمال استفاده شده است. براساس الگوریتم روش تخمین و شبیه‌سازی، به‌منظور بررسی ساختار ناهمسانگردی داده‌های برداشت شده مربوط به عنصر طلا، واریوگرام‌های جهتی این عنصر محاسبه شده‌اند. جهت‌های ناهمسانگردی در راستاهای آزیموت ۳۰ درجه با شیب ۰ درجه، آزیموت ۱۲۰ درجه با شیب ۰ درجه و آزیموت ۲۱۰ درجه با شیب ۰ درجه می‌باشد (شکل ۹).

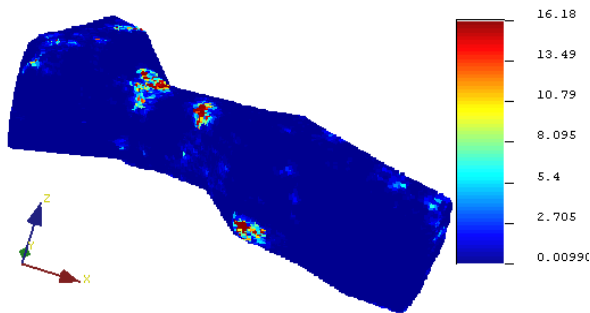


شکل ۹- واریوگرافی‌های عیار طلا در (۱) آزیموت ۳۰ و شیب ۰، (۲) آزیموت ۱۲۰ و شیب ۰، آزیموت ۲۱۰ و شیب ۰

مدل نهایی (نقشه نهایی) ارائه شده است (شکل ۱۴). در مرحله بعد عیار مربوط به بلوک‌ها را از فضای نرمال خارج کرده و به فضای غیر نرمال (واقعی) آورده شدند (شکل ۱۵).



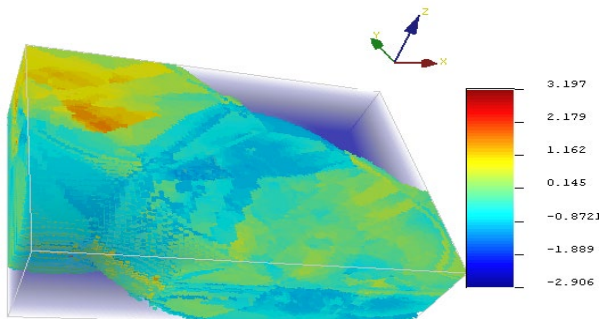
شکل ۱۴- نقشه میانگین شبیه‌سازی کانسار مورد مطالعه با استفاده از فاکتور کانی‌سازی در فضای نرمال



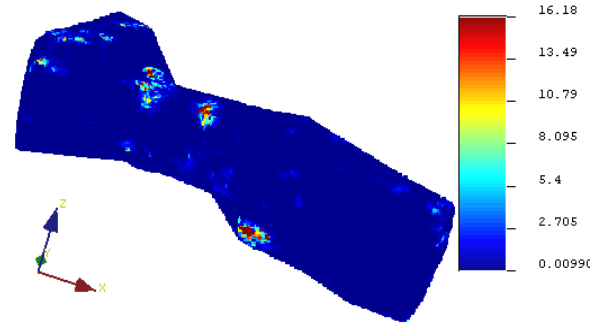
شکل ۱۵- نقشه میانگین شبیه‌سازی کانسار مورد مطالعه با استفاده از فاکتور کانی‌سازی در فضای غیر نرمال

۳-۶-۲- مدل‌سازی کانسار با استفاده از فاکتور سولفیدی

با استفاده از روش کوکریجینگ و واریوگرافی‌های مستقیم و متقابل برای پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی، در ابتدا بلوک‌های موجود در مدل بلوکی تخمین زده شدند (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- نقشه مقادیر تخمینی طلا با استفاده از فاکتور سولفیدی در فضای نرمال



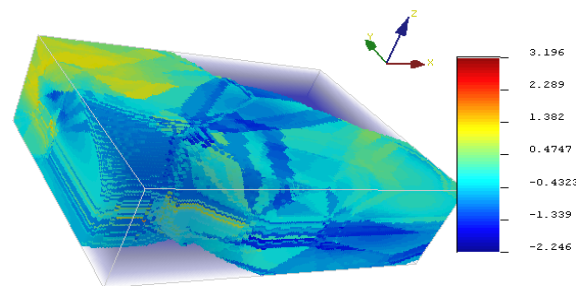
شکل ۱۲- نقشه میانگین شبیه‌سازی تک متغیره عنصر طلا در فضای غیر نرمال

۳-۶-۳- مدل‌سازی توأم کانسار

برای این‌که طلا را با توجه به دو فاکتور موجود تخمین زده و شبیه‌سازی شود باید یک مدل هم ناحیه‌گی خطی برای دو جفت متغیرها در نظر گرفته شود. به این صورت که دو مدل واریوگرافی مستقیم برای هر متغیر و یک مدل واریوگرافی متقابل برای دو متغیر رسم شود تا بتوان شبیه‌سازی و تخمین‌ها را انجام داد.

۳-۶-۱- مدل‌سازی کانسار با استفاده از فاکتور کانی‌سازی

با استفاده از روش کوکریجینگ و واریوگرافی‌های مستقیم و متقابل برای پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی، در ابتدا بلوک‌های موجود در مدل بلوکی تخمین زده شدند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- نقشه مقادیر تخمین طلا با کمک فاکتور کانی‌سازی حاصل از گمانه‌ها در فضای نرمال

براساس نتایج روش کوکریجینگ و محاسبه واریانس تخمین، تابع توزیع تجمعی هر کدام از بلوک‌های موجود در مدل تولید و با استخراج داده‌های تصادفی از تابع شبیه‌سازی توأم کانسار انجام شد. برای این منظور، در ابتدا تحقق‌های متفاوت از کانسار مورد مطالعه بازتولید شد. در نهایت، میانگین مقادیر در هر بلوک تحقق‌های بازتولید شده، محاسبه و به‌عنوان

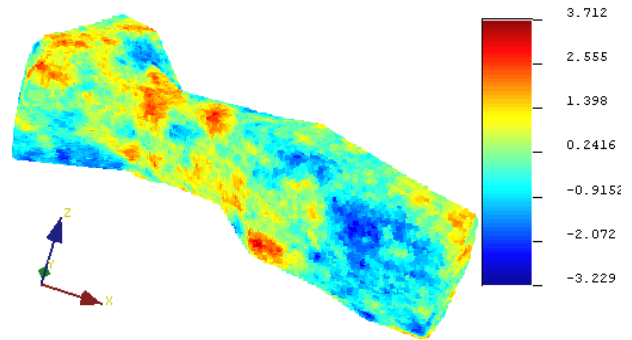
متغیره طلاست متناسب با قسمت کانی‌سازی واحد سنگی است (متناسب با مناطق قرمز رنگ دارای امتیاز ۱). همچنین، برای اعتبارسنجی عددی به تصادف دو گمانه از گمانه‌ها انتخاب می‌شود که در شکل ۱۹ این دو گمانه از بین گمانه‌ها قابل تفکیک است (با فلش مشخص شده‌اند).



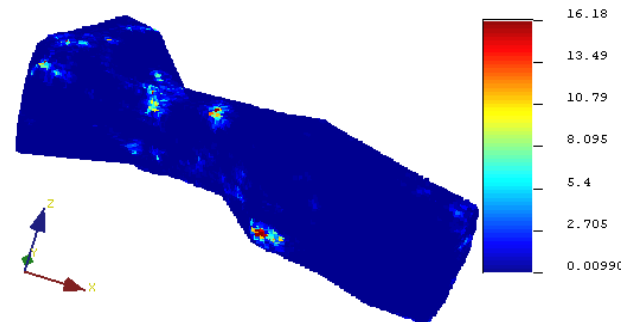
شکل ۱۹- نقشه گمانه‌ها و انتخاب دو گمانه مشخص شده بصورت تصادفی برای اعتبار سنجی

با توجه به حضور ۱۷ گمانه اکتشافی در منطقه مورد مطالعه، دو گمانه به تصادف انتخاب شد (شکل ۱۹) و با استفاده از اطلاعات موجود در این دو گمانه نتایج روش‌های مختلف ارزیابی شدند. برای تخمین عیار طلا در داخل دو گمانه باید یک‌بار تخمین کریجینگ معمولی (طلای تک متغیره) و دو بار تخمین کوکریجینگ معمولی (طلا به وسیله فاکتور سولفیدی و فاکتور کانی‌سازی) انجام شود. لازم به ذکر است تخمین‌ها با توجه به واریوگرافی‌های مربوط به هر متغیر که از قبل موجود بود انجام شد. دو گمانه یکی از شمال غرب (منطقه قینرجه) و دیگری از جنوب غرب (منطقه یگانلی) انتخاب شده‌اند. پس از بررسی و تخمین دو گمانه مقادیر به فضای غیر نرمال آورده شدند. پس از این که داده‌ها به فضای واقعی آورده شدند مقادیر ضریب همبستگی بین داده‌ی تخمینی و داده‌ی واقعی گمانه بیشتر از حالت نرمال شد. می‌توان این محاسبات را در فضای غیر نرمال بررسی کرد ولی یکسری محدودیت‌های وجود دارد. اولین محدودیت این است که برای آنالیز مؤلفه‌های اصلی می‌بایست داده‌ها در فضای نرمال باشند. همچنین در برخی از شبیه‌سازی‌ها داده‌ها باید در فضای نرمال ارزیابی و بررسی شوند. با توجه به شکل ۲۰ برآورد بهتر طلای تخمینی

همانند شبیه‌سازی انجام شده در بخش ۳-۶-۱، با استفاده از نتایج کوکریجینگ، شبیه‌سازی توأم کانسار مورد مطالعه با استفاده از متغیر ثانویه (فاکتور سولفیدی) انجام شد (شکل ۱۷). در مرحله بعد عیار مربوط به بلوک‌ها را از فضای نرمال خارج کرده و به فضای غیر نرمال (واقعی) آورده شدند (شکل ۱۸).



شکل ۱۷- نقشه میانگین شبیه‌سازی کانسار مورد مطالعه با استفاده از فاکتور سولفیدی در فضای نرمال

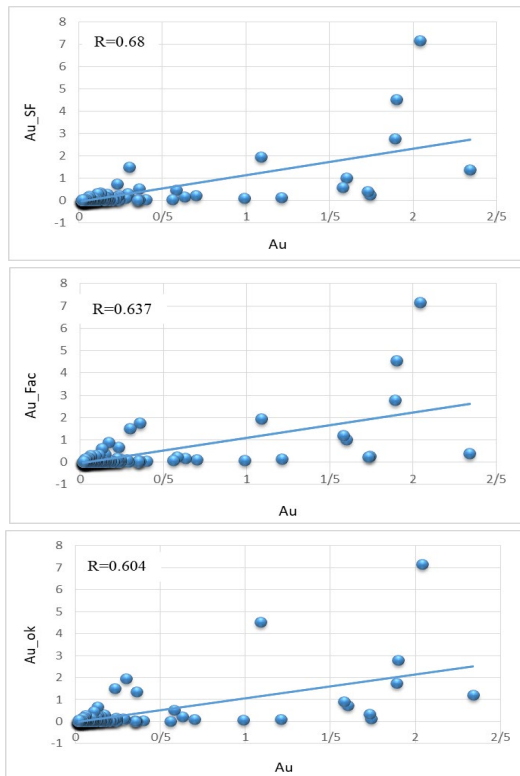


شکل ۱۸- نقشه میانگین شبیه‌سازی کانسار مورد مطالعه با استفاده از فاکتور سولفیدی در فضای غیر نرمال

۷-۳- اعتبارسنجی

همیشه اعتبارسنجی گواهی صحت و دقت مدل‌هاست. چرا که اگر مدلی ساخته شود و دقتی در برآورد متغیرها نداشته باشد این مدل باید رد و یا اصلاح شود. برای این منظور ابتدا یک اعتبارسنجی بصری و سپس یک اعتبارسنجی عددی را ارائه خواهیم داد. برای اعتبارسنجی بصری پیشنهاد می‌شود که اگر مدل‌سازی واحد کانی‌سازی (سنگی) به دقت مشاهده شود و همچنین مدل‌های تخمین زده شده و شبیه‌سازی شده چند و تک‌متغیره طلا مجدداً مشاهده شود می‌توان نتیجه گرفت که جاهایی که نشان‌دهنده عیار بالا در مدل‌های چندمتغیره و تک

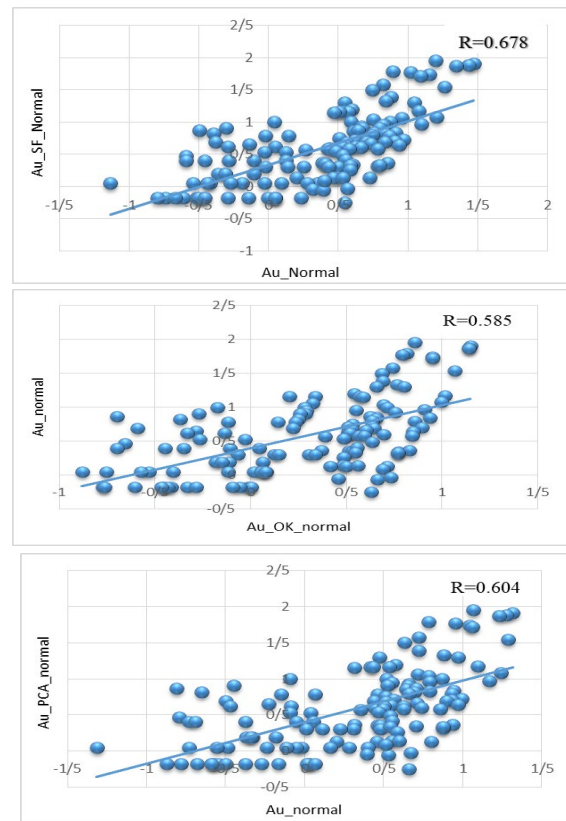
شکل ۲۲ آورده شده است. در شکل زیر خط با رنگ بنفش مربوط به طلا به طلای واقعی موجود در دو گمانه است و خطوط دیگر شامل خط رنگ قرمز مربوط به طلای شبیه‌سازی شده با فاکتور سولفیدی، خط با رنگ آبی مربوط به طلای شبیه‌سازی شده با فاکتور عیاری (کانی‌سازی) و خط سبز رنگ مربوط به طلای شبیه‌سازی شده به صورت تک متغیره طلا است.



شکل ۲۱- اعتبار سنجی مقادیر واقعی طلا با مقادیر تخمین زده شده در فضای واقعی (غیر نرمال) ۱) طلای واقعی با طلای تخمینی به کمک فاکتور سولفیدی، ۲) طلا با طلای تک متغیره تخمین زده شده، ۳) طلای واقعی با طلای تخمینی به کمک فاکتور کانی‌سازی

با بررسی‌های انجام شده، مشاهدات مربوطه و همچنین با تفسیر شکل ۲۲ درمیابیم که طلایی که به واسطه فاکتور سولفیدی شبیه‌سازی و تخمین زده شده (منحنی قرمز رنگ) به مقادیر طلای واقعی گمانه (منحنی بنفش) نزدیک تر است. محور افقی نمودار از شماره ۱ تا شماره ۶۴ مربوط به گمانه با شناسه BH-YG-26A (اختصار بیان شده مربوط به شماره گمانه و منطقه حفر (یگانگی)) است که در قسمت جنوب غربی

به کمک داده‌های ثانویه (تخمین چند متغیره) نسبت به تخمین تک‌متغیره طلا نشان داده شده است.



شکل ۲۰- اعتبار سنجی مقادیر واقعی نرمال طلا با مقادیر تخمین زده شده در فضای نرمال ۱) طلای واقعی با طلای تخمینی به کمک فاکتور سولفیدی، ۲) طلا با طلای تک متغیره تخمین زده شده، ۳) طلای واقعی با طلای تخمینی به کمک فاکتور کانی‌سازی

همان‌طور که از شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مشخص است، نتایج فاکتور سولفیدی حاصل همبستگی بیشتری با مقادیر طلا در داده‌های گمانه‌ای و مقادیر تخمین زده شده دارند. دلیل آن می‌تواند گسترش و توزیع آن در منطقه باشد (داده‌های موجود بیشتر از دیگر داده‌ها) اما همان‌گونه که ذکر شد نتایج حاصل از مدل‌سازی فاکتور کانی‌سازی حاصل به واقعیت زمین‌شناسی کانسار نزدیک‌تر (چون دارای مقادیر واقعی در گمانه‌ها می‌باشند) هستند. برای بررسی این که مقادیر تخمین زده شده توسط داده‌های ثانویه دارای همبستگی بیشتری با داده‌های اصلی می‌باشند، نمودار توزیع عیاری هر کدام از تخمین‌ها به همراه توزیع عیاری طلای واقعی موجود در گمانه‌ها هم در حالت داده‌های نرمال و هم در حالت داده‌های غیرنرمال در

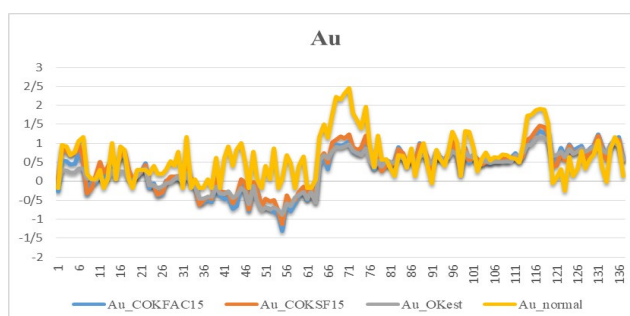
۴- نتیجه‌گیری

اکثر کانسارهای طلای جهان به‌صورت رگه، رگه‌ای و پراکنده هستند، به خاطر وجود عناصر و کانی‌های همراه طلا و رفتارهای خاص ژئوفیزیکی که از خود نشان می‌دهند، توسط برداشت‌های صحرایی یا هوایی متناسب با بزرگی کانسار و مرحله اکتشاف مربوطه انجام می‌شود و داده‌ها توسط گیرنده‌ها و سنجنده‌ها برداشت‌شده و درنهایت با اعمال شرایط و ویرایش‌های مربوطه، داده‌ها وارد عملگرهای نظیر و مربوطه می‌شود و با توجه به رفتارهای یادشده آنومالی‌هایی به‌صورت مدل‌های دو یا سه‌بعدی قابل مشاهده هستند که این آنومالی‌ها نشان‌دهنده وضعیت و نوع جهت‌گیری توده کانساری در زیرزمین می‌شود. این احتمال وجود دارد که بزرگی آنومالی با وضعیت قرارگیری در زیرزمین کاملاً یکسان نباشد (در بعضی از پردازش‌ها می‌تواند یکسان باشد. بعضاً بستگی به خطاهای وارده مختلف دارد که می‌تواند از کیفیت کار بکاهد) ولی طرز قرارگیری و جهت‌گیری‌ها را نشان می‌دهد.

چون در مراحل میانی اکتشاف در مناطقی که داده‌های ژئوفیزیک برداشت می‌شود در منطقه با شبکه‌بندی محدودتر یکسری حفاری هم در محدوده انجام می‌شود چراکه از قبل یک برداشت کلی در منطقه انجام‌شده و یکسری مناطق به‌عنوان مناطق امیدبخش معدنی انتخاب می‌شود و در ادامه آن برداشت‌ها در مقیاس کوچک‌تر انجام می‌شود و بعد از برداشت‌های ژئوفیزیکی، گمانه‌ها با توجه به آنومالی‌های مشخص شده حفر می‌شوند، این بسته به کل مطالعات بررسی‌شده در منطقه دارد. جاهایی که داده‌ی حفاری و ژئوفیزیک در مقیاس کوچک‌تر هم برداشت می‌شود می‌تواند یک هم‌پوشانی قوی را بین داده‌های برداشتی حاصل از گمانه و داده‌هایی که نشانگر خاصیت فیزیکی زمین هستند (که داده‌های ژئوفیزیکی از آنان یاد می‌شود) می‌تواند بسیار کارآمد باشد.

با به‌کارگیری اپراتورهای چندمتغیره آماری نظیر آنالیز مؤلفه‌های اصلی، کریجینگ توام (کوکریجینگ)، شبیه‌سازی گوسی متوالی توام می‌توان با درگیر کردن تعداد متغیرهای

مدل بلوکی قرار می‌گیرد که مقادیر پایینی از فاکتور سولفیدی را دارد. از شماره ۶۴ تا ۱۳۷ مربوط به گمانه با شناسه BH-NE-01 (اختصار بیان شده مربوط به شماره گمانه و منطقه حفر (قینرجه یا نرجه)) است که در منطقه‌ای با سولفید و کانی‌سازی بالا حفر شده است. مطابق شکل ۲۲ در گمانه‌ای که در منطقه قینرجه حفر شده با توجه به این‌که مقدار سولفید در این منطقه (با توجه به مدل‌سازی‌ها و پروفیل‌ها) بالاست؛ عیار طلا با استفاده از مدل‌سازی‌ها به‌ویژه دو مدل تخمینی به‌واسطه فاکتور یا متغیر ثانویه (فاکتور کانی‌سازی و فاکتور سولفیدی) بهتر تخمین خورده و شبیه‌سازی شده است. ولی در منطقه‌ی یگانگی که گمانه حفر شده و در سطح، همبستگی قابل توجهی با مقادیر تخمینی دارد و این مقدار در عمق کاهش می‌یابد. از آنجا که طلا به‌همراه کانی‌های سولفیدی (پیریت (FeS_2))، آرسنوپیریت ($FeAsS$)، کالکوپیریت ($CuFeS_2$)، زرنیخ زرد یا اورپیمنت (AsS_3)، زرنیخ قرمز یا رالگار (AsS) و ... یافت می‌شود پایین بودن سولفید با پایین بودن کانی‌های سولفیدی اصلی و پایین بودن کانی‌های سولفیدی متناسب است با کاهش فاکتور سولفیدی و فاکتور کانی‌سازی (عیاری) متناسب است. با توجه به شکل مقادیر عیار بالا به واسطه مدل‌های ارائه شده بهتر مدل‌سازی می‌شود. قسمت مهم و مورد انتظار این شکل این است که با تغییرات مقادیر طلای واقعی، طلاهای مدل‌شده نیز تغییر می‌کنند.



شکل ۲۲- بررسی مقادیر واقعی طلا با مقادیر تخمین زده شده در فضای نرمال در دو گمانه

سولفیدی بیشتر باشد مقادیر شبیه‌سازی شده و تخمین زده شده میانگین بالاتری دارد و به داده‌های واقعی نزدیک‌تر است.

منابع

- [1] Journel, A.G., 1974, "Geostatistics for conditional simulation of ore bodies". *Economic Geology* 69(5), 673-687.
- [2] Lantuéjoul, C., 2013, "Geostatistical simulation: models and algorithms". Springer Science & Business Media.
- [3] Rahimi, H., Asghari, O., Hajizadeh, F., 2018, "Selection of optimal thresholds for estimation and simulation based on indicator values of highly skewed distributions of ore data". *Natural Resources Research*, 27(4), 437-453.
- [4] Chiles, J. P., Delfiner, P., 2012, "Geostatistics: Modeling spatial uncertainty". New Jersey: Wiley.
- [5] Armstrong, M., 1998, "Basic linear geostatistics". Berlin: Springer.
- [6] Safikhani, M., Asghari, O., Emery, X., 2017, "Assessing the accuracy of sequential gaussian simulation through statistical testing". *Stochastic environmental research and risk assessment* 31(2), 523-533.
- [7] Talesh Hosseini, S., Asghari, O., Ghavami Riabi, S. R., 2018, "Spatial modelling of zonality elements based on compositional nature of geochemical data using geostatistical approach: a case study of Baghqlloom area, Iran". *Journal of Mining and Environment* 9(1), 153-167.
- [8] طالش حسینی، سجاد؛ مرادزاده، علی؛ اصغری، امید؛ ۱۳۹۸؛ " کاربرد شبکه برنامه‌ریزی GERT در ساختار مدیریت پروژه‌های شبیه‌سازی زمین آماری در کانسار مس - طلا دالی شمالی استان مرکزی"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۱۴، شماره ۴۲، صفحه ۳۲ تا ۴۶.
- [9] Mehrabi, B., Yardley, B.W.D., Komminue, A., 2003, "Modelling the As-Au association in hydrothermal gold mineralization: Example of Zarshuran deposit, NW Iran".
- [10] Ghane, B., Asghari, O., 2017, "Modeling of mineralization using minimum/maximum

دیگر (متغیرهای ثانویه‌ای که با متغیر اولیه همبستگی داشته باشد در اینجا از متغیرهای فاکتور سولفیدی و فاکتور کانی-سازی به‌عنوان متغیرهای ثانویه استفاده شده بود) نتایج شبیه-سازی‌ها و تخمین‌ها را به‌صورت چشمگیری بهبود بخشید. این نتیجه به‌خوبی در بخش اعتبار سنجی قابل مشاهده بود.

با توجه به تمامی مدل‌های ساخته شده عیاری و دقت منتج مدل‌ها که عددی مابین ۶۰ تا ۷۰ درصد است. با توجه به زمین‌شناسی پیچیده محیط کانسار اگر مدلی ۷۰ درصد دقت داشته باشد می‌توان از آن به‌عنوان یک مدل کاربردی در محیط‌های معدنی استفاده کرد. چون مقدار بالای این دقت مربوط به فاکتور سولفیدی است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل سولفیدی نتایج بهتری را ارائه داده است. دلیل این همبستگی بیشتر مدل سولفیدی با مدل واقعی در مقایسه با دیگرمدل‌ها می‌تواند بخاطر این باشد که داده‌های ژئوفیزیکی در بین داده‌ها گسترش بیشتری دارند. در کل بین این سه مدل بهترین مدل ژئوفیزیکی است پس از آن مدل مربوط به فاکتور کانی‌سازی و در نهایت مدل تخمین تک متغیره است. اگر با دقت به پروفیل و شبه مقطع‌های ژئوفیزیکی ساخته شده در نرم افزار RES2DINV می‌توان گفت با حرکت از پروفیل ۱ (شمال غرب) به سمت پروفیل ۱۷ (جنوب شرق) مقدار پلاریزاسیون القایی کاهش می‌یابد. فاکتور سولفیدی که ترکیبی از مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی است، محدوده‌هایی را به‌صورت آنومالی سولفیدی نشان می‌دهد که دارای مقاومت پایینی (رسانا) نیز باشند. با بررسی گمانه‌ها در حالت عادی و همچنین با بررسی مدل‌های ساخته شده غیرنرمال این مسئله کاملاً قابل مشاهده است. با توجه به خروجی مدل‌ها و اعتبارسنجی انجام شده این مدل می‌تواند دقت بالاتری داشته باشد در حالت‌هایی مثل ایجاد گمانه‌های بیشتر که کار را برای تخمین نهایی ذخیره با دقت بیشتری انجام دهد، چرا که در معدن و موارد معدنی هر چه خطاهای اندازه‌گیری و تحلیل بیشتر باشد احتمال ریسک را بالاتر می‌برد. با توجه به خروجی‌های به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در مدلی که از فاکتور سولفیدی برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود هر چه مقادیر فاکتور

- [20] Rondon, O., 2012, "Teaching aid: minimum/maximum autocorrelation factors for joint simulation of attributes". *Mathematical Geosciences*, 44(4), 469-504.
- [21] Desbarats, A.J., Dimitrakopoulos, R., 2000, "Geostatistical simulation of regionalized pore-size distributions using min/max autocorrelation factors". *Mathematical Geology*, 32(8), 919-942.
- [۲۲] نوروزی باغکمه، غلامحسین؛ ۱۳۹۲؛ "روش های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، جلد اول.
- [23] Abedi, M., Asghari, O., Norouzi, G.H., 2015, "Collocated cokriging of iron deposit based on a model of magnetic susceptibility: a case study in Morvarid mine, Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 8(4), 2179-2189.
- [۲۴] نوروزی باغکمه، غلامحسین؛ ۱۳۹۲؛ "ژئوفیزیک اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، جلد اول.
- [25] Loke, M.H., 2003, "Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method". Geotomo Software. Manual.
- [26] Dey, A., Morrison, H.F., 1979, "Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures". *Geophysics*, 44(4), 753-780.
- [27] Silvester, P. P., Ferrari, R. L., 1996, "Finite elements for electrical engineers". Cambridge university press.
- [28] Asghari, O., Sheikhmohammadi, S., Abedi, M., Norouzi, G.H., 2016, "Multivariate geostatistics based on a model of geo-electrical properties for copper grade estimation: a case study in Seridune, Iran". *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 57(1).
- [۲۹] شیخ محمدی، سمیه؛ اصغری، امید؛ نوروزی باغکمه، غلامحسین؛ ۱۳۹۳؛ "استفاده از متغیر کمکی ضریب سولفیدی به منظور بهبود نتایج برآورد مس با کوکریجینگ هممختصات و کریجینگ با روند بیرونی"، نشریه ژئوفیزیک ایران، دوره ۸، شماره ۱، صفحه ۴۵ تا ۵۸.
- autocorrelation factor: case study Sury Gunay gold deposit NW of Iran". *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 17(3), 186-193.
- [11] Wackernagel, H., 2013, "Multivariate geostatistics: an introduction with applications". Springer Science & Business Media.
- [12] Rezaee, H., Marcotte, D., 2017, "Integration of multiple soft data sets in MPS thru multinomial logistic regression: a case study of gas hydrates". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(7), 1727-1745.
- [13] Lee, S. J., 2005. "Models of soft data in geostatistics and their application in environmental and health mapping". PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill.
- [14] Xu, W., Tran, T.T., Srivastava R.M., 1992, "Integrating seismic data in reservoir modeling; the collocated cokriging alternative". SPE Annual technical conference and exhibition, Society of Petroleum Engineers, Washington, DC, 833-842. 4-7 October.
- [15] Sinclair, A.J. and Blackwell, G.H., 2006. *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge University Press.
- [16] Rossi, M.E. and Deutsch, C.V., 2013. *Mineral resource estimation*. Springer Science & Business Media.
- [17] Soltani, F., Afzal, P., Asghari, O., 2014, "Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration-volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran". *Journal of Geochemical Exploration* 140, 64-76.
- [18] Zelterman, D., 2015, "Applied multivariate statistics with R". Cham: Springer.
- [19] Davis, J.C., Sampson, R.J., 1986, "Statistics and data analysis in geology". Vol. 646. New York et al.: Wiley.