

مکان‌یابی بهینه گمانه‌های تکمیلی در کانسار انگوران با هدف کمینه‌سازی خطای رده‌بندی نادرست

سعید سلطانی محمدی^{۱*}؛ محمد صفا^۲

۱- استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه کاشان، saeedsoltani@kashanu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه کاشان، modsafa@grad.kashanu.ac.ir

(دریافت ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۴، پذیرش ۲۹ مهر ۱۳۹۴)

چکیده

یکی از مسائل مطرح در مراحل مختلف از عمر معدن، طراحی بهینه موقعیت حفر گمانه‌های تکمیلی است. اگرچه هدف از این حفاری‌ها در مراحل مختلف متفاوت بوده و در نتیجه ساختار مسئله بهینه‌سازی نیز باید متفاوت باشد، با این وجود در اکثر الگوریتم‌هایی که برای مکان‌یابی بهینه این گمانه‌ها ارائه شده‌اند، اهداف اکتشافی همچون کاهش عدم قطعیت مدل بلوکی و افزایش ارزش اطلاعات حاصل از حفاری به‌عنوان تابع هدف تعریف و به افزایش دقت در کلاسه‌بندی باطله و ماده معدنی توجه نشده است. در این مقاله سعی شده است تا بر اساس پارامتر احتمال کلاسه‌بندی نادرست، تابع هدف مناسب برای بهینه‌سازی موقعیت گمانه‌های تکمیلی تعریف شود. کارایی این تابع هدف در مکان‌یابی بهینه گمانه‌های تکمیلی با استفاده از روش تبرید شبیه‌سازی شده در کانسار انگوران بررسی و ثابت شد. یکی از مزیت‌های این تابع هدف نسبت به توابع هدف معمول این است که علاوه بر رابطه مستقیمی که با واریانس کریجینگ دارد، به عیار تخمینی و عیار حد نیز وابسته است. هرچه اختلاف عیار تخمینی و عیار حد افزایش یابد، مقدار احتمال کلاسه‌بندی نادرست کاهش می‌یابد. از آنجا که عیار حد و عیار تخمینی با افزایش تعداد گمانه‌ها ثابت باقی خواهند ماند، تنها راه کاهش احتمال کلاسه‌بندی نادرست کاهش واریانس تخمین در این مناطق در نتیجه حفر گمانه در موقعیت‌های مناسب است.

کلمات کلیدی

احتمال رده‌بندی نادرست، گمانه تکمیلی، بهینه‌سازی، تبرید شبیه‌سازی شده

۱- مقدمه

مطالعات امکان‌سنجی، طراحی معدن، برنامه‌ریزی و جهت‌گیری فعالیت‌های معدن، جریان نقدینگی و افزایش بهره‌وری کارخانه فراوری تأثیرگذار است. بنابراین اغلب تعدادی از گمانه‌های حفاری با هدف کاهش خطای کلاسه‌بندی نادرست ماده معدنی و باطله حفر می‌شوند. در صورتی که موقعیت این گمانه‌ها بر اساس توابع هدف معمول (مبتنی بر کاهش واریانس تخمین) طراحی شوند، نتایج حاصل از آن‌ها تأثیر بهینه را روی کاهش خطای کلاسه‌بندی نادرست نداشته و در نتیجه بهره‌وری پایینی خواهند داشت. از این رو در این مقاله تلاش شده است تا با تعریف تابع هدف بر اساس کمینه‌سازی خطای کلاسه‌بندی نادرست، بهره‌وری گمانه‌های حفر شده با هدف تعیین مرز بلوک‌های ماده معدنی و باطله افزایش یابد.

۲- مرور مطالعات گذشته

پیشینه تحقیق جامع در مسائل نمونه‌برداری، به مطالعات هاسل (۱۹۳۸) و ماهالانوبیس (۱۹۴۰) در زمینه تغییرات واریانس نمونه‌برداری به‌عنوان تابعی از خصوصیات هندسی شبکه نمونه‌برداری باز می‌گردد [۱۴، ۱۵]. کونویل (۱۹۴۹) و داس (۱۹۵۰) تحقیق در زمینه کارایی شبکه‌های نمونه‌برداری را توسعه داده و نشان دادند که در شرایطی که مدل خودهمبستگی خطی است، نمونه‌برداری تصادفی ردیفی واریانس کمتری نسبت به الگوی تصادفی دارد [۱۶، ۱۷]. مطالعات زوربرزیکي (۱۹۵۸) برای حالتی که مدل خودهمبستگی غیرخطی باشد، نشان داد که در این شرایط نمونه‌برداری سیستماتیک کارا تر است و نمونه‌برداری تصادفی و نمونه‌برداری کارایی کمتری دارند [۱۸].

درو (۱۹۷۴) تحقیقات را به سمت شبکه حفاری گمانه‌ها (الگوی حفاری و فاصله‌داری گمانه‌ها) هدایت کرد [۱۹]. محققین مختلف برای طراحی شبکه حفاری، اهداف مختلفی همچون ارتقا احتمال کشف و دستیابی به دقت تخمین عیار مطلوب را ارائه کردند. در مواردی که هدف از حفاری کشف کانسار است، تابع هدف به‌صورت بیشینه‌سازی احتمال کشف کانسار تعریف شد. احتمال کشف کانسار تابعی است از پارامترهای هندسی و جهتی کانسار مورد جستجو و پارامترهای شبکه حفاری [۲۰]. در این راستا، تحقیقات وسیعی در فضای دوبعدی [۲۲، ۲۱] و سه‌بعدی [۲۳، ۲۴] در اکتشاف ذخایر نفتی [۱۹] و معدنی [۲۱] انجام شده است. از آنجا که کاهش فاصله‌داری گمانه‌ها باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود، شاریجین

از اواخر دهه ۱۹۸۰، استفاده از روش‌های مکان‌یابی گمانه‌های تکمیلی به‌عنوان ابزاری باارزش در طراحی و مدیریت پروژه‌های اکتشافی تفصیلی مطرح شد [۳-۱]. هزینه بسیار بالای حفاری‌های اکتشافی و محدودیت‌های بودجه‌ای پروژه‌های اکتشافی به‌عنوان محرک‌های اصلی، منجر به توسعه این روش‌ها در خلال سال‌های گذشته شد [۴-۸]. مسئله مکان‌یابی گمانه‌های تکمیلی به این صورت قابل تعریف است که:

"انتخاب مجموعه‌ای از مختصات نقاط $S = \{s_1, \dots, s_n\} \subset D$ برای حفر گمانه‌های اکتشافی، به‌نحوی که ماکزیمم اطلاعات ممکن در رابطه با محدوده مورد مطالعه D است به‌دست آید." در شرایطی که معیارهای ارزیابی در خصوص مکان‌یابی گمانه مشخص و تعداد نقاط کاندیدا برای حفر گمانه محدود باشد، مسئله مکان‌یابی گمانه‌ها به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی قابل تعریف است. روش نیمه‌دستی بر اساس چنین شرایطی ارائه شده است [۹، ۱۰]. هرچند استفاده از این روش بهتر از انتخاب موقعیت حفاری براساس تجربه کارشناسان است ولی این فرآیند قادر به یافتن مکان بهینه حفر گمانه‌های اکتشافی نیست. به این دلیل که فرض‌های ساده‌کننده بالا حاکم نیست، تعداد نقاط کاندیدا برای حفر گمانه نامحدود است و معیار ارزیابی کیفیت الگوی حفاری براساس هدف متغیر است؛ در عمده روش‌های ارائه شده پس از روش نیمه‌دستی، فضای نمونه‌برداری پیوسته فرض شده و در نتیجه تعداد نقاط کاندیدا نامحدود است. همچنین گمانه‌های اکتشافی در مراحل مختلف عمر معدن (از آشنایی تا نزدیک به بسته شدن معدن) [۱۱] و با اهداف متفاوتی همچون اندازه‌گیری مشخصات یا ساختار زون کانی‌زایی شده، مشخص کردن مرزهای کانی‌زایی، ارتقا رده‌بندی ذخیره، کنترل عیار و نمونه‌برداری توده‌ای برای مطالعات پایلوت متالورژی انجام می‌شود [۱۲] و در نتیجه معیارهای ارزیابی نیز باید متناسب با این اهداف بسیار متنوع باشند. معیارهای ارزیابی تعریف شده تا کنون به تابع واریانس تخمین [۱، ۲، ۳]، میانگین واریانس تخمین وزن‌دار نسبت به عیار [۱۳]، ارزش کمی اطلاعات [۷] و ارزش واقعی اطلاعات [۸] محدود است. این توابع ارزیابی گمانه‌های اکتشافی در شرایطی مناسب است که هدف از حفر گمانه‌های اکتشافی، بهبود کیفیت تخمین و رده‌بندی ذخیره است.

تخمین دقیق مرز ماده معدنی/باطله برای طراحی فنی و اقتصادی ضروری است و دقت مرز تخمینی بر روی نتایج

میانگین هزینه خطا با استفاده از الگوریتم تبادل تدریجی حل کردند [۲۹]. بورگر و بیرکنهاک (۱۹۹۴) بیان کردند که در فعالیت‌های اکتشافی تصمیم‌گیری نهایی در مورد نمونه‌های اضافی باید بر اساس ملاک‌های زیر صورت گیرد: (۱) بخش‌های با عیار بیشتر جذابیت بیشتری نسبت به بقیه دارند و در نتیجه نیاز به نمونه‌برداری چگال‌تری دارند. (۲) بخش‌های با واریانس تخمین بیشتر، نیازمند نمونه‌های چگال‌تری هستند. (۳) بخش‌های با تغییرپذیری محلی، نمونه‌برداری چگال‌تری را می‌طلبد [۳۰]. گوریا و همکارانش (۲۰۰۱ و ۲۰۰۲) کاربرد آنالیز بیزین را برای ارزیابی تأثیر اطلاعات (حفاری) اضافی در ارزیابی ذخیره را بررسی کردند [۳۱، ۳۲]. حسنی پاک و همکاران (۲۰۰۳) با ارائه تابع GET که در آن علاوه بر تأثیر واریانس تخمین در مکان‌یابی گمانه‌ها به ضخامت و عیار ماده معدنی نیز توجه شده است، مسئله مکان‌یابی گمانه‌های تکمیلی را حل کردند [۳۳]. سلطانی و هزارخانی (۲۰۰۹) مسئله بهینه‌سازی حفر گمانه‌های اکتشافی تکمیلی را بر اساس مدل سه‌بعدی کانسار و با هدف کمینه‌سازی واریانس تخمین به کمک الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده حل کردند [۴]. بر اساس این مطالعه مشخص شد که تمایل بیشتری به حفر گمانه‌های تکمیلی در قسمت‌های ضخیم‌تر کانسار وجود دارد، زیرا حفاری گمانه‌های تکمیلی در این بخش‌ها، منجر به کاهش واریانس تخمین و عدم قطعیت برای حجم بیشتری از کانسار می‌شود. سلطانی و همکاران (۲۰۱۱) کارایی الگوریتم ژنتیک را در حل مسئله مکان‌یابی گمانه‌های حفاری تکمیلی را در گستره سه-بعدی کانسار نشان دادند [۵]. سلطانی و همکاران (۲۰۱۲) بر اساس رهنمودهای بورگر و بیرکنهاک (۱۹۹۴) تابع هدف سنتی (کمینه‌سازی واریانس تخمین) را تغییر داده و کمینه‌سازی واریانس تخمین وزن‌دار نسبت به عیار تخمینی بلوک را پیشنهاد و مسئله را با استفاده از روش تبرید شبیه‌سازی شده حل کردند [۱۳، ۳۰]. نتیجه این تغییر در تابع هدف، تمایل بیشتر گمانه‌های تکمیلی در زون‌های با عیار بالا مشاهده شد. سلطانی و هزارخانی (۲۰۱۳) توابع جدیدی را بر مبنای تئوری اطلاعات برای اندازه‌گیری ارزش واقعی و آماری اطلاعات ارائه کرده و از آن‌ها در مکان‌یابی بهینه گمانه‌های تکمیلی با استفاده از روش‌های مبتنی بر تبرید شبیه‌سازی شده استفاده کردند [۸]. همچنین سلطانی و هزارخانی (۲۰۱۳) الگوریتمی برای مکان‌یابی بهینه گمانه‌های جهت‌دار ارائه دادند [۷].

(۱۹۷۶) بحث شبکه موثر بهینه را مطرح کرد [۲۵]. در مواردی که هدف از حفر گمانه، تخمین عیار کانسار در یک سطح اطمینان مطلوب باشد، تابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی واریانس کریجینگ گلوبال تعریف می‌شود [۳-۱]. قهواش در سال ۱۹۸۷ با اشاره به لزوم توجه به داده‌های در دسترس در مکان‌یابی گمانه، روشی را برای مکان‌یابی بهینه گمانه و عمق آن بر اساس داده‌های ژئوفیزیک برداشت‌شده ارائه داد [۲۶]. کیم و همکاران (۱۹۷۷ و ۱۹۸۱) و والتون و کاوفمن (۱۹۸۲) تحقیق در زمینه مکان‌یابی گمانه‌های تکمیلی به روش نیمه-دستی برای انتخاب موقعیت حفر گمانه‌ها ارائه دادند [۱۰، ۹، ۲۷]. مبنای این روش بر تقسیم منطقه مورد نظر به چندین بلوک، محاسبه واریانس تخمین برای هر بلوک، انتخاب بلوک‌هایی با بیشترین واریانس تخمین به‌عنوان موقعیت حفر گمانه بعدی و سپس محاسبه تأثیر این گمانه (به فرض حفر آن) بر روی واریانس تخمین کل است. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا مقدار قابل قبولی برای واریانس کریجینگ کل محاسبه شود. در ادامه اسپچک و چو (۱۹۸۳) روشی را بر پایه روش بهینه‌سازی ریاضی ارائه کردند که بر خلاف الگوریتم نیمه‌دستی توانایی یافتن جواب‌های بهینه مسئله را دارد [۲]. اما در این الگوریتم نیز از دو فرض ساده کننده زیر استفاده شده بود: (۱) از گسترش سه‌بعدی گمانه‌ها و ماده معدنی چشم‌پوشی شده و (۲) اوزان کریجینگ در فرایند بهینه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده‌اند. زیدروسکی (۱۹۸۳) الگوریتم دیگری را بر اساس روش بهینه‌سازی انشعاب و تحدید مطرح کرد [۱]. این الگوریتم از نظر توابع هدف تعریف‌شده جامعیت بیشتری داشته و قادر به محاسبه موقعیت بهینه گمانه‌ها (با هدف کمینه کردن واریانس تخمین) و کمینه‌سازی تعداد گمانه‌ها (تحت شرایطی است که واریانس تخمین هر یک از بلوک‌ها از حد مشخصی تجاوز نکند) است. گرشون در سال ۱۹۸۳ استفاده از یک الگوریتم جستجو انشعاب و تحدید را برای تعیین موقعیت گمانه‌های اکتشافی پیشنهاد کرد [۲۸]. در ادامه گرشون و همکاران در سال ۱۹۸۸ با استفاده از یک روش جدید توانستند ترکیبی از روش‌های قدیمی بهینه‌سازی موقعیت گمانه‌های اکتشافی تکمیلی را در کنار استفاده بهتر از کامپیوتر ارائه دهند، در این روش ضمن توجه به کاهش واریانس، محدودیت‌های هزینه نیز لحاظ شده و برای اولین به گسترش سه‌بعدی گمانه‌های تکمیلی توجه شد [۳]. آسپیه و همکاران (۱۹۹۰) هزینه ناشی از خطای کم تخمینی و بیش تخمینی را تعریف و مسئله مکان‌یابی گمانه‌های تکمیلی را با هدف کمینه کردن

۳- خطای رده‌بندی نادرست

کلاسه‌بندی اشتباه ماده معدنی به یکی از دو شکل کم کلاسه‌بندی و بیش کلاسه‌بندی خواهد شد [۳۶].
اگر بلوک باطله (یعنی $Z(x_i) < g_c$) در نتیجه خطای تخمین به اشتباه به عنوان ماده معدنی طبقه‌بندی شود، خطای بیش کلاسه‌بندی اتفاق می‌افتد (شکل الف-۱). همچنین اگر بلوک ماده معدنی ($Z(x_i) > g_c$) در نتیجه خطای تخمین به اشتباه به عنوان باطله طبقه‌بندی شود، خطای کم کلاسه‌بندی اتفاق می‌افتد (شکل ب-۱).

احتمال کلاسه‌بندی نادرست هر بلوک را می‌توان بر اساس شکل تابع توزیع و انحراف استاندارد تخمین محاسبه کرد [۳۷]. مساحت زیر سطح منحنی بخشی از تابع توزیع که در آن عیار از عیار حد بزرگ‌تر است ولی عیار تخمینی (Z) از عیار حد کوچک‌تر است (شکل ۲-الف)، معادل احتمال کم کلاسه‌بندی و مساحت زیر سطح منحنی بخشی از تابع توزیع که در آن عیار از عیار حد کوچک‌تر است ولی مقدار تخمینی (Z) از عیار حد بزرگ‌تر است (شکل ۲-ب)، معادل احتمال بیش کلاسه‌بندی هر بلوک (P_{oc}) را می‌توان با محاسبه انتگرال احتمال بر روی محدوده خطای تصمیم به صورت زیر محاسبه کرد:

$$P_{oc} = \int_{Z^* - 3\sigma}^{g_c} f(X) dX \quad (4)$$

$$P_{uc} = \int_{g_c}^{Z^* + 3\sigma} f(X) dX$$

که فراوانی توزیع احتمال $f(x)$ برای هر بلوک از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(X - Z^*)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

از آنجا که در هر بلوک تنها یکی از این دو نوع خطا ممکن است اتفاق بیفتد (با توجه به مقادیر عیار حد و عیار تخمینی)، احتمال خطای کلاسه‌بندی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

فرض کنید که در کانسار D متشکل از N بلوک $v_i \in D \subset R^3$, $i = 1, \dots, N$ ، تعداد K گمانه اولیه حفر و از آن‌ها تعداد M نمونه با مقادیر $Z(x_j)$, $j = 1, \dots, M$ برداشت شده باشد. عیار متوسط بلوک‌ها $Z(v_i)$ یکی از پارامترهای کلیدی در مراحل امکان‌سنجی فنی و اقتصادی و طراحی معدن است. چون مقدار واقعی این پارامتر تنها پس از استخراج بلوک، قابل اندازه‌گیری است، در مراحل امکان‌سنجی و طراحی (پیش از استخراج بلوک) از مقدار تخمینی آن $Z^*(v_i)$ بر اساس داده‌های مجاور استفاده می‌شود که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z^*(v) = \sum_{j=1}^M \lambda_j Z(x_j) \quad (1)$$

که λ_j وزن اختصاص یافته به نمونه Z است که مقدار آن بر اساس حل سیستم معادلات خطی زیر تعیین می‌شود:

$$\sum_{j=1}^M \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \bar{\gamma}(v, x_i) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^M \lambda_j = 1$$

که در آن $\gamma(x_i, x_j)$ مقدار واریوگرام بین موقعیت‌های x_i و x_j و $\bar{\gamma}(v, x_i)$ میانگین واریوگرام بین بلوک v و موقعیت x_i است [۳۴]. متداول‌ترین روش تخمین مورد استفاده در علوم زمین و مهندسی معدن، روش کریجینگ است [۳۵]. محصول جانبی کریجینگ، واریانس کریجینگ σ_k^2 است که به صورت زیر بیان می‌شود:

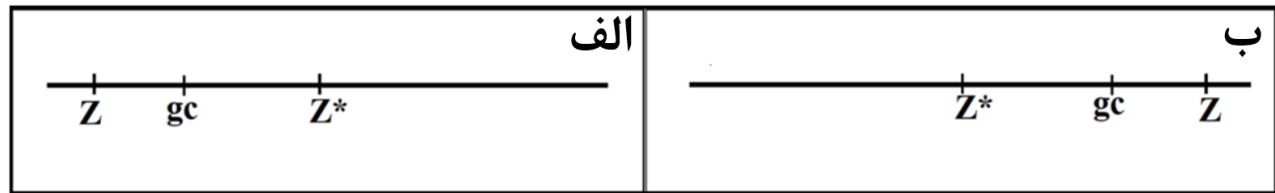
$$\sigma_k^2 = 2 \left[\sum \lambda_j \bar{\gamma}(v, s_i) \right] - \sum \sum \lambda_i \lambda_j \bar{\gamma}(x_i, x_j) - \bar{\gamma}(v, v) \quad (3)$$

همچنین جذر واریانس تخمین به صورت خطای استاندارد کریجینگ S_K تعریف می‌شود.

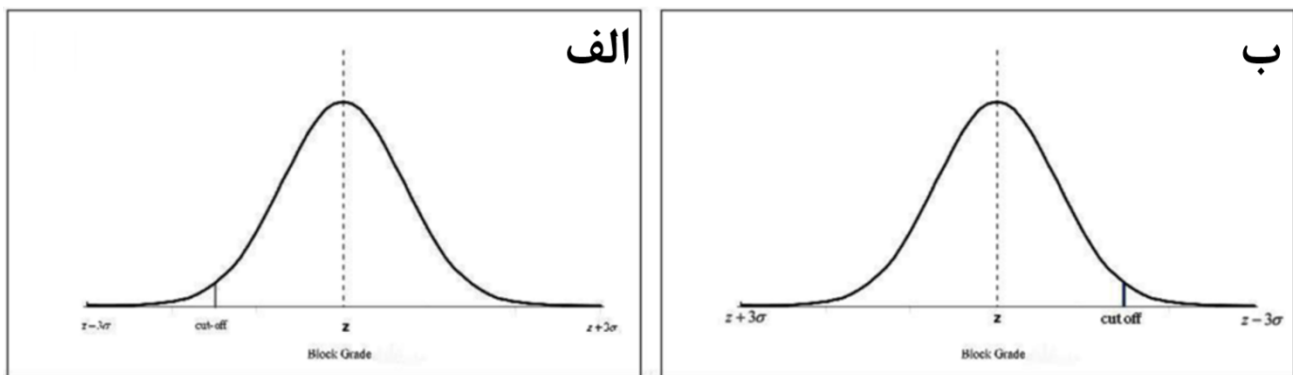
بر اساس $Z^*(v_i)$ و عیار حد g_c ، بلوک‌ها را می‌توان به دو رده ماده معدنی و باطله کلاسه‌بندی نمود. اگر $Z^*(v_i) > g_c$ آنگاه بلوک به رده ماده معدنی تعلق دارد و در غیر این صورت باطله. یکی از مشکلات متداول تمامی تخمین‌گرها کم تخمینی و بیش تخمینی عیار است که این مسئله باعث بروز مشکل

$$\Pr(v_i) = I_{uc}(v_i)P_{uc}(v_i) + I_{oc}(v_i)P_{oc}(v_i) = I_u(i) \int_{Z^*(v_i) - 3\sigma(v_i)}^{cut-off} f(X) dX + I_o \int_{Z^*(v_i) - 3\sigma(v_i)}^{cut-off} f(X) dX \quad (6)$$

$$I_{oc}(v_i) = \begin{cases} 1 & ; cutoff < Z(v_i) \\ 0 & ; otherwise \end{cases}, \quad I_{uc}(v_i) = \begin{cases} 1 & ; cutoff > Z(v_i) \\ 0 & ; otherwise \end{cases}$$



شکل ۱: بیش کلاسه‌بندی (الف) و کم کلاسه‌بندی (ب)



شکل ۲: تابع توزیع احتمال نرمال برای مقدار تخمینی Z^* با خطای استاندارد کریجینگ σ ، خطای کم کلاسه‌بندی (الف) و بیش کلاسه‌بندی (ب)

رده‌بندی ذخیره است، ثابت شده است، ولی استفاده از آن در شرایطی که هدف از حفر گمانه تکمیلی تفکیک باطله و ماده معدنی است مناسب نیست. بر این اساس کمینه‌سازی مجموع خطای کلاسه‌بندی ذخیره به‌عنوان تابعی از عیار متوسط تخمینی و واریانس کریجینگ بلوک‌ها به صورت تابع هدف تعریف شد:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \text{Pr}(v_i) \quad (7)$$

اثرات مختلف کم کلاسه‌بندی و بیش کلاسه‌بندی در برنامه‌ریزی عملیات استخراج معدن و اهمیت آن‌ها با استفاده از وزن‌های مختلف برای هر یک از آن‌ها در تابع هدفی به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

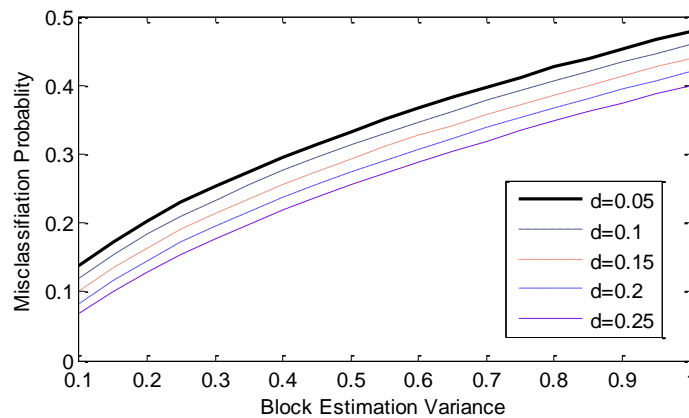
در شکل ۳ رابطه بین واریانس تخمین و احتمال کلاسه‌بندی اشتباه را برای مقادیر متفاوتی از "اختلاف میان عیار تخمینی و عیار حد" (d) نشان داده شده است. بر این اساس با افزایش واریانس تخمین احتمال کلاسه‌بندی اشتباه نیز افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود احتمال کلاسه‌بندی اشتباه علاوه بر رابطه مستقیم با واریانس تخمین بلوک، با d رابطه عکس دارد و هر چه d افزایش یافته احتمال کلاسه‌بندی اشتباه نیز افزایش یافته است.

۴- تعریف تابع هدف

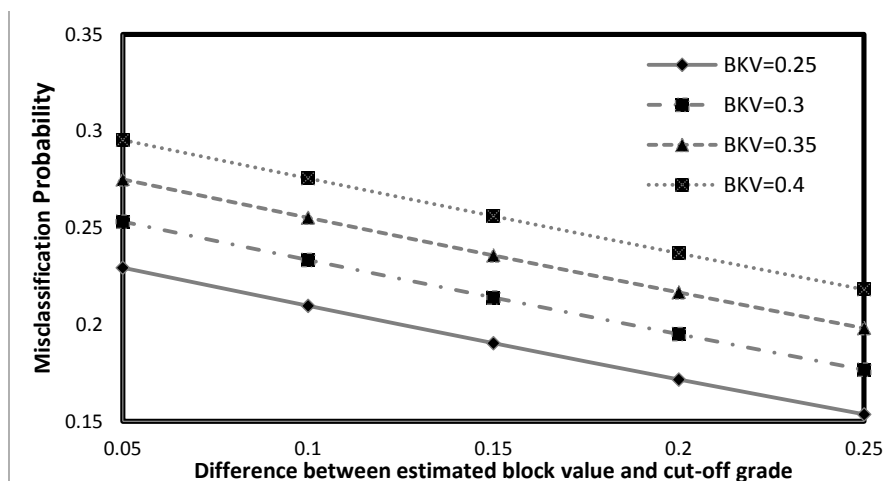
یکی از نکات کلیدی در کارایی نتایج مسائل بهینه‌سازی، میزان تطابق تابع هدف با نیازی است که بر اساس آن مسئله تعریف شده است. تابع هدف متداول در بهینه‌سازی گمانه‌های تکمیلی (و به‌صورت مشابه نمونه‌های تکمیلی)، کمینه‌سازی واریانس تخمین است. اگرچه کارایی این تابع هدف در مواردی که هدف از حفر گمانه‌های تکمیلی، بهبود کیفیت تخمین و یا ارتقا

که در آن w_1 و w_2 به ترتیب اوزان مربوط به کم کلاسه‌بندی و بیش کلاسه‌بندی می‌باشند.

$$\begin{aligned} \text{Min } W(v_i) &= I_{uc}(v_i)P_{uc}(v_i) + I_{oc}(v_i)P_{oc}(v_i) \\ I_o(v_i) &= \begin{cases} w_1 & ; g_c < Z(v_i) \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \\ I_u(v_i) &= \begin{cases} w_2 & ; g_c > Z(v_i) \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$



شکل ۳: رابطه بین واریانس تخمین و احتمال کلاسه‌بندی اشتباه



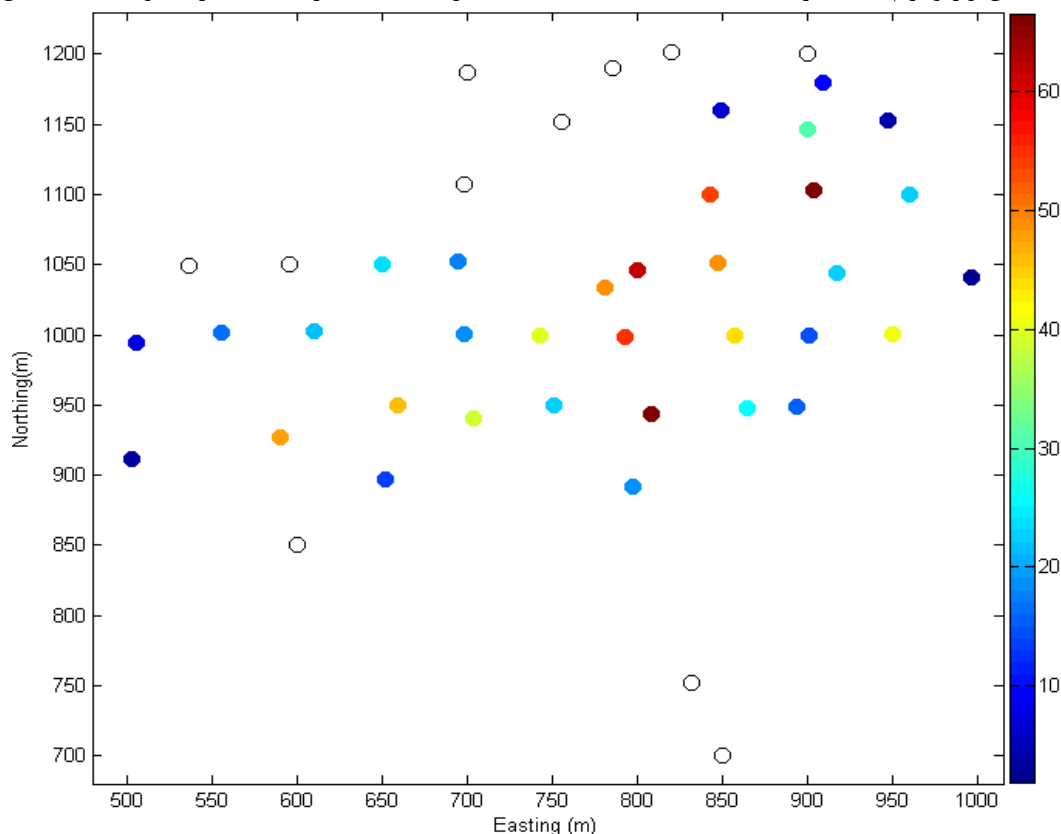
شکل ۴: رابطه بین احتمال کلاسه‌بندی اشتباه و اختلاف بین مقدار عیار تخمینی بلوک و عیار حد. (BKV واریانس کریجینگ بلوک است.)

کربناتی است [۳۸]. ذخیره کل کانسار ۱۹,۳ میلیون تن مخلوط کانسنگ سولفیدی-غیر سولفیدی است که ۱۴,۶ میلیون تن این ذخیره غیر سولفیدی با عیار ۲۲٪ روی و ۴,۶٪ سرب و ۴,۷ میلیون تن ذخیره سولفیدی با عیار ۲۷,۷٪ روی و ۲,۴٪ سرب و ۱۰۰ گرم در تن نقره را شامل می‌شود [۳۹]. از مجموع ۴۴ گمانه اکتشافی اولیه حفر شده در محل کانسار، با در نظر گرفتن عیار ۱۰٪ Zn به عنوان عیار حد، تعداد ۳۳

۵- مطالعه موردی

به منظور بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده، یک مطالعه موردی در زمینه مکان‌یابی گمانه‌های تکمیلی در کانسار انگوران ارائه شده است. کانسار روی و سرب انگوران در ۱۰ کیلومتری غرب زنجان و در شمال شرق شهرستان تکاب قرار دارد. کانسار انگوران یکی از مهم‌ترین نهشته‌های سرب و روی سولفیدی-

تکمیلی و ۶) پارامترهای کلیدی روش تبرید شبیه‌سازی شده. تمامی نمونه‌های اولیه برداشت شده از گمانه‌ها به‌عنوان ورودی مرحله مکان‌یابی تعریف شده و بر اساس آن‌ها مدل بلوکی سه‌بعدی کانسار نیز به روش مدل‌سازی محدود و بر اساس ابعاد بلوک ۲۰×۲۵×۲۵ متر تهیه شد. در شکل ۶ واریوگرام تجربی داده‌های نرمال شده عیار Zn نشان داده شده است که به آن یک مدل کروی با رنج ۶۷ متر و سقف و اثر قطعه‌ای به ترتیب برابر با ۱ و ۰,۳۱ برآزش یافته است. سپس بر اساس روش کریجینگ عیار Zn در بلوک‌ها تخمین زده شد.



شکل ۵: نقشه پراکندگی موقعیت گمانه‌های اولیه کانسار انگوران، دایره توخالی: گمانه باطله، دایره توپر: گمانه ماده معدنی

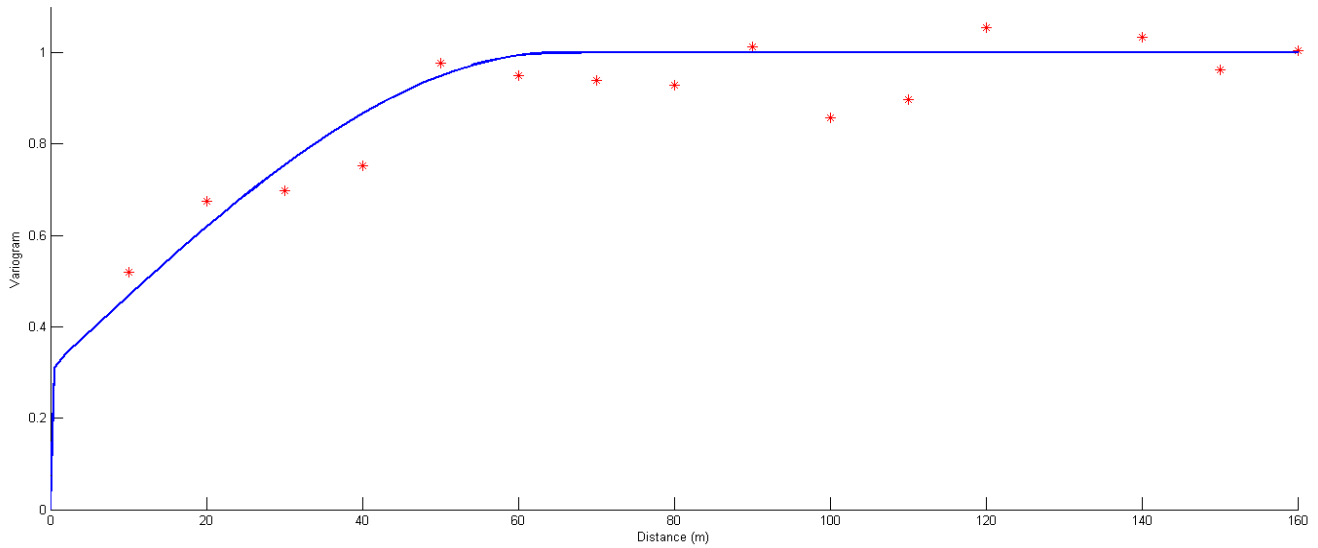
سریع را برای تعداد ۵ گمانه تکمیلی نشان می‌دهد. نتایج اجرای الگوریتم برای تابع سریع در عیار حد ۱۰٪ روی برای تعداد ۵ گمانه تکمیلی در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۸ موقعیت گمانه‌های تکمیلی و اولیه بر روی مدل توزیع عیار در سه تراز ارتفاعی مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکثر گمانه‌های تکمیلی در بلوک‌هایی با مقادیر عیاری نزدیک به عیار حد و به عبارت دیگر در محدوده عیاری مرز بین ماده معدنی و باطله پیشنهاد شده‌اند. در شکل ۹ نیز موقعیت

گمانه به متر از ۱۱۷۶ متر با ماده معدنی برخورد کرده است. نقشه پراکندگی موقعیت گمانه‌های اولیه در شکل ۵ ارائه شده است. پس از اعمال عیار حد و کامپوزیت کردن گمانه‌ها با طول ۵ متر، ۱۰۰۵ متر از گمانه‌های اولیه عیار بالاتر از عیار حد و ۲۹۵ متر عیاری پایین‌تر از عیار حد داشتند. ورودی‌های الگوریتم مکان‌یابی بهینه گمانه‌های تکمیلی بر اساس کمینه‌سازی خطای کلاسه‌بندی اشتباه عبارتند از (۱) موقعیت گمانه‌های اولیه و نمونه برداشت شده از آن‌ها، (۲) مدل بلوکی کانسار (۳) مدل واریوگرام، (۴) عیار حد، (۵) تعداد گمانه

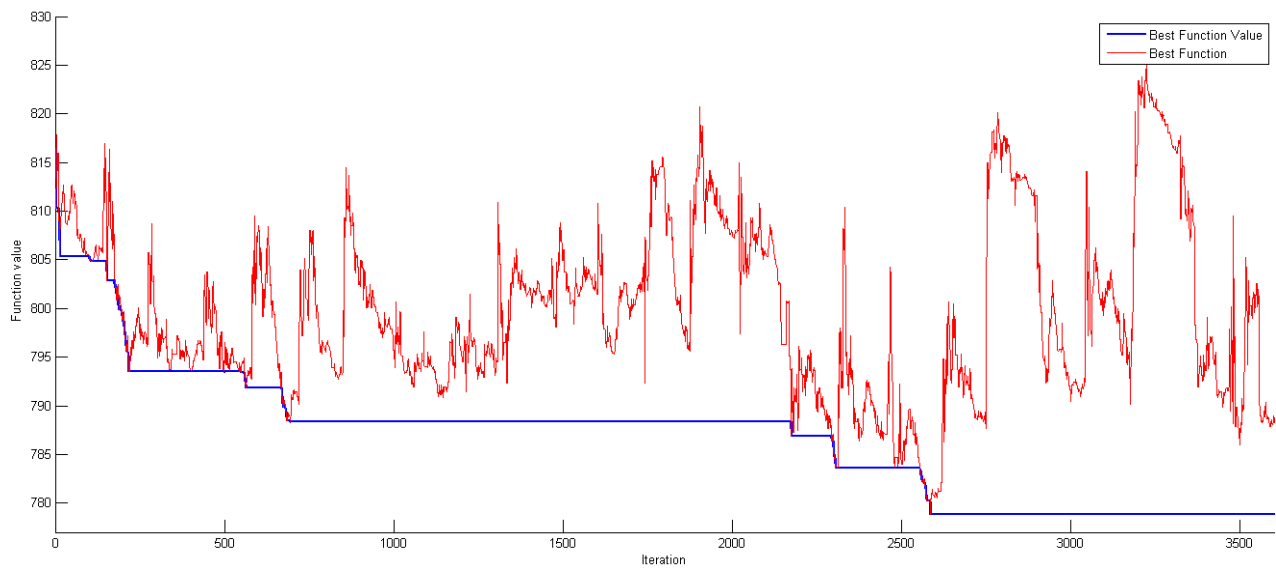
به‌منظور تعیین پارامترهای کلیدی تبرید شبیه‌سازی شده شامل دمای اولیه، تابع بروز رسانی دما از روش سعی و خطا استفاده شد. نتایج این مطالعات نشان داد که دمای اولیه ۵۰۰ و تابع به‌روزرسانی دمای خطی از بین تمامی توابع (نمایی، لگاریتمی و خطی) به‌عنوان بهترین گزینه‌ها برای اجرای الگوریتم می‌باشند. سپس الگوریتم موردنظر برای دو تابع بولتزمن و سریع اجرا شد. نتایج نشان داد تابع سریع برای اجرای این الگوریتم مناسب‌تر می‌باشد. شکل ۷ روند بهینه‌سازی و مقدار تابع هدف برای تابع

بین باطله و کانسنگ که واریانس تخمین بالاست (در نتیجه تعداد کم گمانه‌های اولیه در آن محدوده) پیشنهاد شده‌اند. این نکته تأییدی بر کارایی الگوریتم ارائه شده است.

گمانه‌های تکمیلی و اولیه بر روی مدل توزیع واریانس تخمین در سه تراز ارتفاعی مختلف ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است اکثر گمانه‌های تکمیلی در محدوده‌های مرز



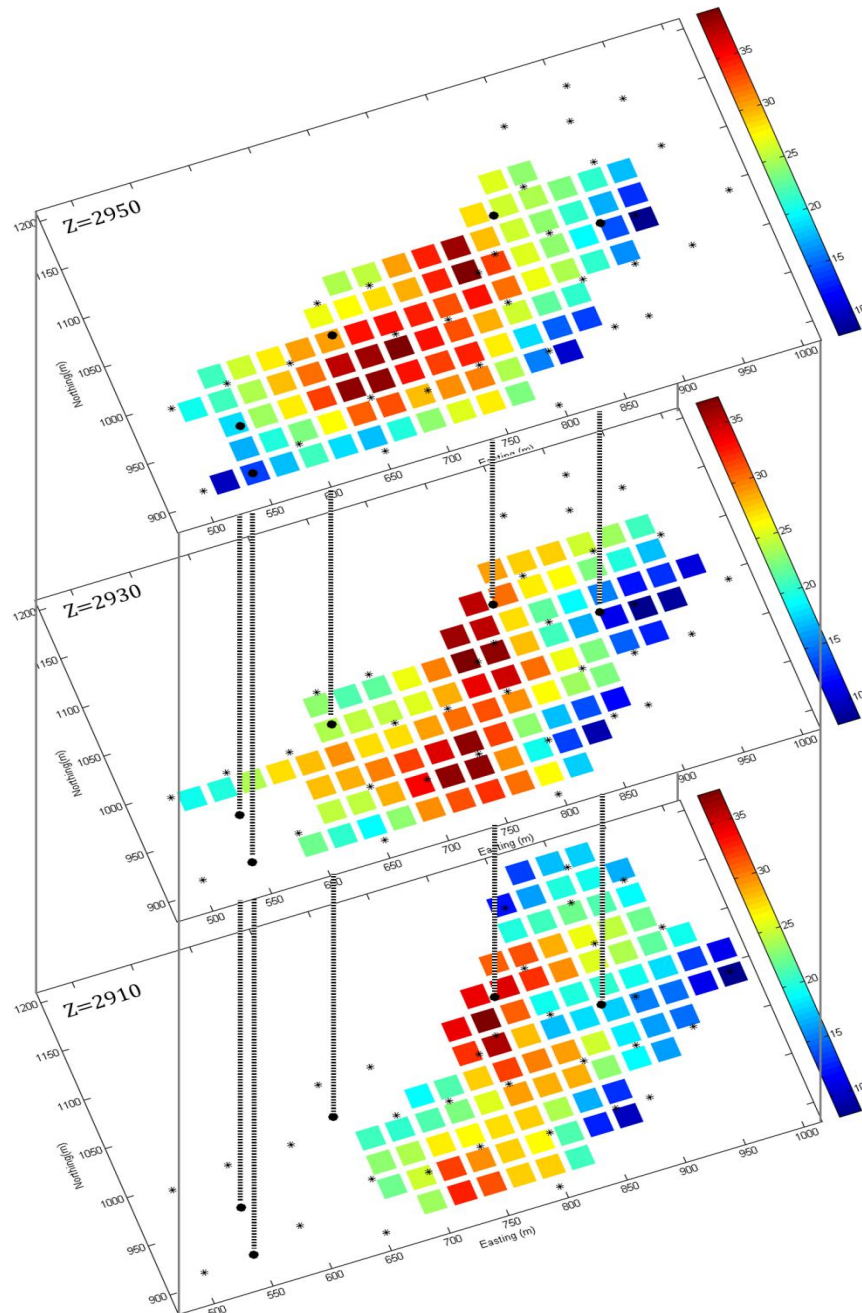
شکل ۶: واریوگرام داده‌های نرمال شده



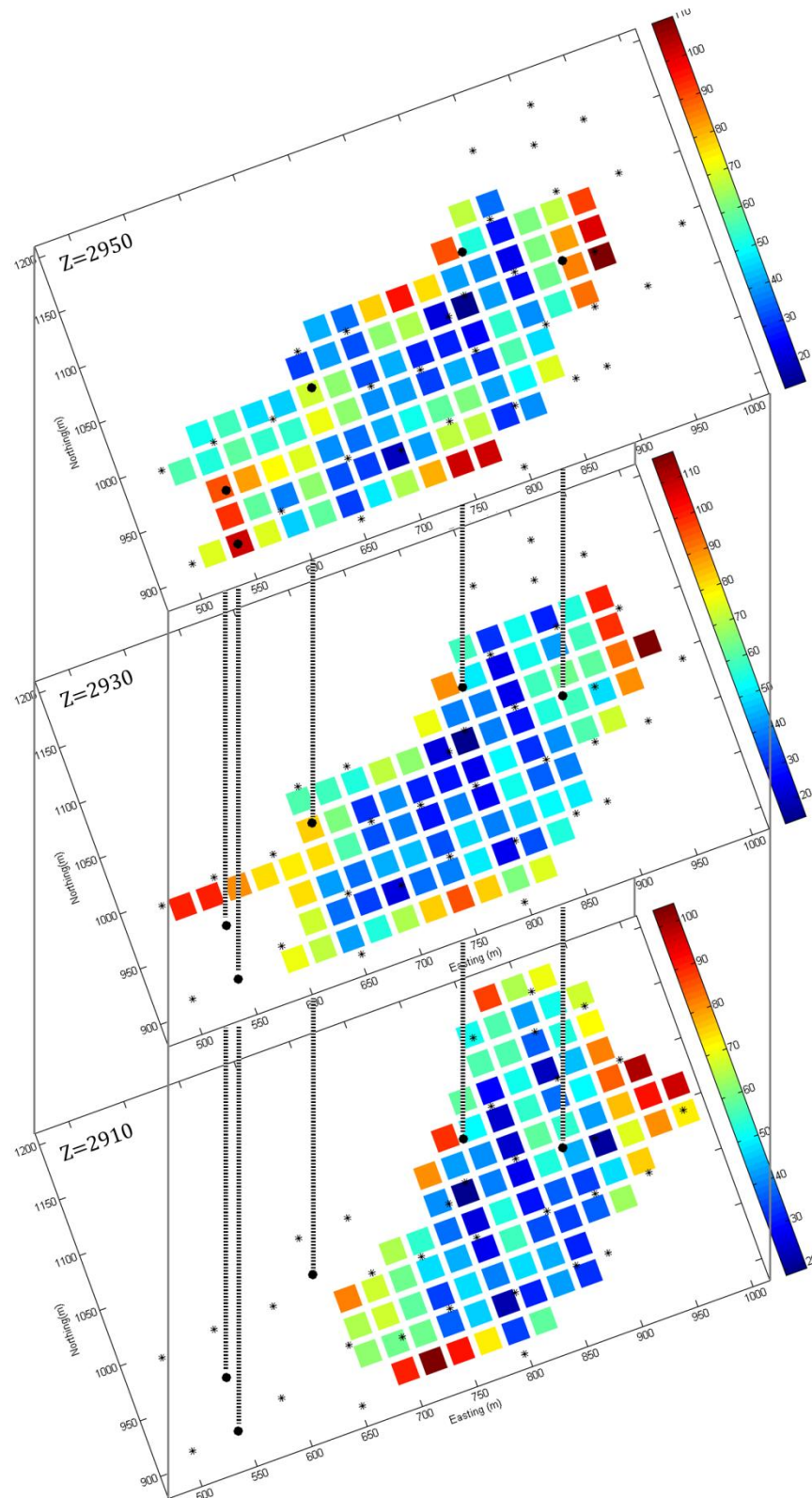
شکل ۷: نتایج اجرای الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده برای تابع سریع برای تعداد ۵ گمانه تکمیلی

جدول ۱: گمانه های تکمیلی بدست آمده از الگوریتم

	BH ₁	BH ₂	BH ₃	BH ₄	BH ₅
X	۸۱۱	۶۵۱	۸۸۸	۵۴۶	۵۵۲
Y	۱۰۸۲	۱۰۱۷	۱۰۴۶	۹۱۴	۹۵۹
Z	۲۹۸۰	۳۰۰۰	۲۹۸۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰



شکل ۸: موقعیت گمانه های تکمیلی و اولیه روی مدل توزیع عیار در سه تراز ارتفاعی ۲۹۱۰، ۲۹۳۰ و ۲۹۵۰ متری. ستاره سیاه موقعیت گمانه اولیه، دایره سیاه موقعیت گمانه تکمیلی، نوار خط چین گمانه تکمیلی است.



شکل ۹: موقعیت گمانه‌های تکمیلی و اولیه روی مدل توزیع واریانس تخمین در سه تراز ارتفاعی ۲۹۱۰، ۲۹۳۰ و ۲۹۵۰ متری. ستاره سیاه موقعیت گمانه اولیه، دایره سیاه موقعیت گمانه تکمیلی، نوار خط‌چین گمانه تکمیلی است.

کاهش تابع هدف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ و شکل ۱۰ ارائه شده است. در این مطالعه متوسط مترآژ هر گمانه ۱۵۰ متر و هزینه هر متر حفاری ۲۰۰ هزار تومان در نظر گرفته شده است. میزان تغییرات تابع هدف و روند بهینه‌سازی برای تعداد مختلف گمانه‌های تکمیلی در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ و جدول ۲ نشان داده شده است، اضافه شدن گمانه‌های تکمیلی تأثیر مثبتی بر روند کاهش تابع هدف داشته است، این روند کاهش در مورد تعداد ۵، ۱۰، ۱۵ و حتی ۲۰ گمانه تکمیلی قابل توجه است، اما اضافه شدن تعداد گمانه‌های تکمیلی به بیش از ۲۰ گمانه با توجه به تغییرات کاهش اندک مقدار تابع هدف و افزایش هزینه‌ها توجیه‌پذیر نمی‌باشد. در نتیجه در صورتی که محدودیت‌های مالی و زمانی اجازه دهد مناسب‌ترین تعداد گمانه‌های تکمیلی به‌منظور کاهش عدم قطعیت مرزهای کانسار ۲۰ حلقه گمانه است.

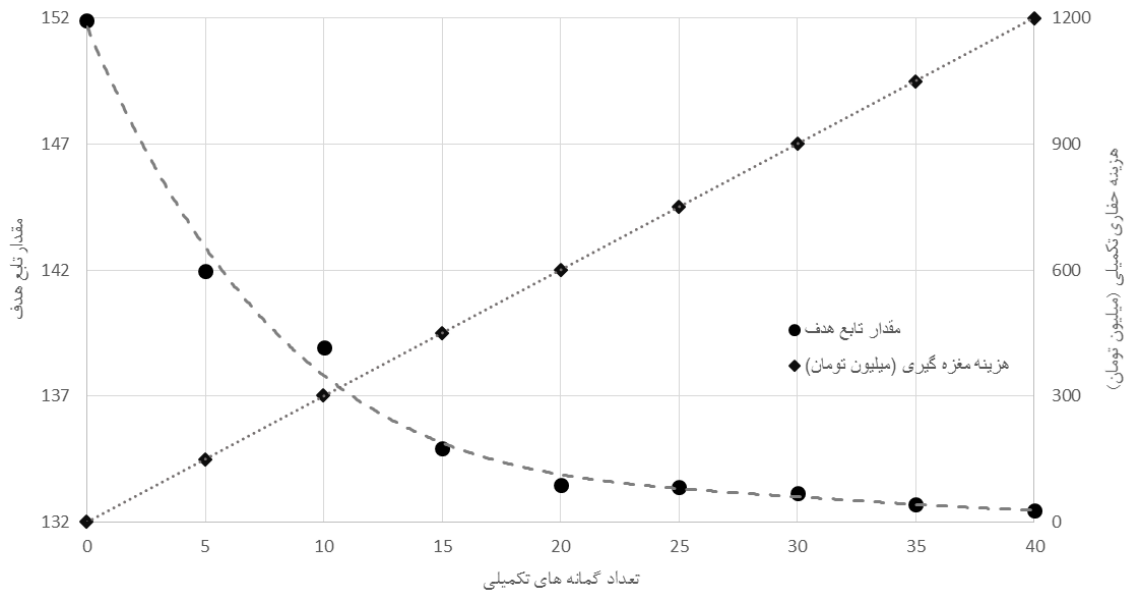
۶- بررسی تأثیر تعداد گمانه حفاری تکمیلی بر تغییرات

تابع هدف و هزینه حفاری

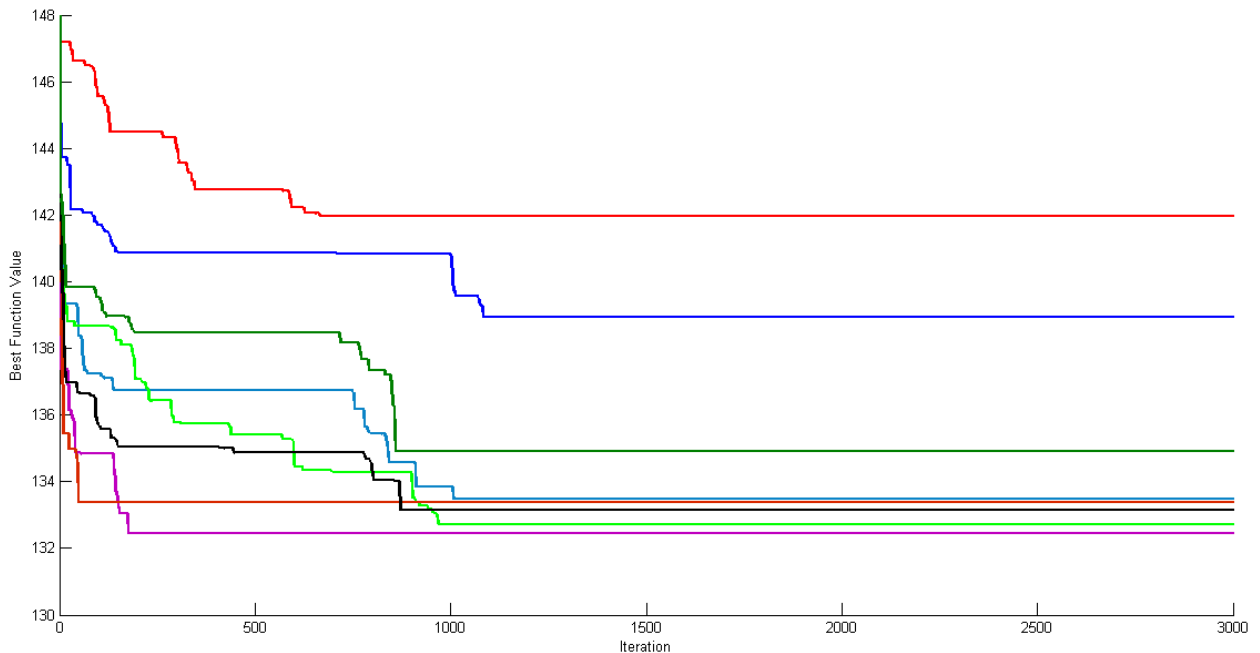
هدف از حفاری تکمیلی بدست آوردن اطلاعات بیشتر در مورد تغییرپذیری در کانسار و کاهش عدم قطعیت است. دستیابی به این اطلاعات مستلزم پرداخت هزینه است. حتی در شرایط فقدان محدودیت‌های بودجه‌ای و زمانی، صرف هزینه‌های مرتبط با گردآوری اطلاعات تا میزان مشخصی امکان‌پذیر و توجیه‌پذیر است و انجام هزینه بیش از این مقدار توجیه‌پذیر نیست. روند کاهش عدم قطعیت، مقدار تابع هدف و یا خطای مربوطه می‌تواند معیار مناسبی برای تعیین تعداد مطلوب گمانه‌های تکمیلی در صورت عدم وجود محدودیت‌های بودجه‌ای باشد. برای بررسی این روند در مطالعه حاضر تعداد گمانه‌های تکمیلی پیشنهادی از صفر تا ۴۰ گمانه تکمیلی از نظر مترآژ حفاری، هزینه حفاری، مقدار تابع هدف و میزان

جدول ۲: تغییرات تابع هدف و مترآژ و هزینه حفاری بر اساس تعداد گمانه حفاری تکمیلی

تعداد گمانه	مترآژ حفاری	هزینه حفاری تکمیلی (میلیون تومان)	مقدار تابع هدف	میزان کاهش تابع هدف
۰	۰	۰	۱۵۱,۹۰۳	۰
۵	۷۵۰۰	۱۵۰	۱۴۱,۹۷۷	۹,۹۲۶
۱۰	۱۵۰۰	۳۰۰	۱۳۸,۹۳۷	۳,۰۴۰
۱۵	۲۲۵۰	۴۵۰	۱۳۴,۹۴۶	۳,۹۹۱
۲۰	۳۰۰۰	۶۰۰	۱۳۳,۴۷۵	۱,۴۷۱
۲۵	۳۷۵۰	۷۵۰	۱۳۳,۳۹۳	۰,۰۸۲
۳۰	۴۵۰۰	۹۰۰	۱۳۳,۱۴۰	۰,۲۵۳
۳۵	۵۲۵۰	۱۰۵۰	۱۳۲,۷۰۳	۰,۴۳۷
۴۰	۶۰۰۰	۱۲۰۰	۱۳۲,۴۵۰	۰,۲۵۳



شکل ۱۰: تغییرات تابع هدف و هزینه حفاری بر اساس تعداد گمانه های تکمیلی



شکل ۱۱: نتایج اجرای الگوریتم تبرید شبیه سازی شده برای تعداد گمانه های تکمیلی مختلف

طراحی شود. در اکثر الگوریتم هایی که پیش از این برای این منظور ارائه شده اند، اغلب اهداف اکتشافی همچون کاهش عدم قطعیت مدل بلوکی و افزایش ارزش اطلاعات حاصله مطرح شده اند و به اهداف معدن کاری توجهی نشده است. در این مقاله با وارد کردن مفهوم خطای کلاسه بندی، تابع هدف جدیدی ارائه شده است که با اهداف مطرح در فاز استخراج مطابقت

۷- نتیجه گیری

طراحی موقعیت حفر گمانه های تکمیلی یک از موضوعات چالش برانگیز در طراحی پروژه های اکتشافی و معدنی است که در فازهای مختلف از عمر معدن مطرح می شود و در هر مرحله باید بر اساس نیازهای آن مرحله موقعیت گمانه های تکمیلی

منابع

- [۱] Szidarovszky, F., 1983. "Multiobjective Observation Network Design for Regionalized Variables", International Journal of Mining Engineering 1, pp 331-342.
- [۲] Chou, D. and Schenk, D. E., 1983. "Optimum Locations for Exploratory Drill Holes", International Journal of Mining Engineering 1, pp. 343-355.
- [۳] Gershon, M., Allen, L.E., Manley, F., 1998. "Application of a new approach for drillholes location optimization", International Journal of Mining, Reclamation and Environment 2, pp. 27-31.
- [۴] Soltani, S. and A. Hezarkhani, 2009. "Additional exploratory boreholes optimization based on three-dimensional model of ore deposit", Archives of Mining Sciences 54: 495-506.
- [۵] Soltani, S., A. Hezarkhani, A. Erhan Tercan and B. Karimi, 2011a. "Use of genetic algorithm in optimally locating additional drill holes", Journal of Mining Science 47(1): 62-72.
- [۶] Soltani, S. and A. Hezarkhani, 2011b. "Determination of realistic and statistical value of the information gathered from exploratory drilling", Natural Resources Research 20(4): 207-216.
- [۷] Soltani, S. and A. Hezarkhani, 2013a. "Proposed algorithm for optimization of directional additional exploratory drill holes and computer coding", Arabian Journal of Geosciences 6(2): 455-462.
- [۸] Soltani-Mohammadi, S. and A. Hezarkhani, 2013b. "A Simulated Annealing-Based Algorithm to Locate Additional Drillholes for Maximizing the Realistic Value of Information", Natural Resources Research 22(3): 229-237.
- [۹] Kim, Y. C., Martino, F., Chopra, I., 1981. "Application of geostatistics in a coal deposit. Mining Engineering 33 (11), pp. 1476-1481.
- [۱۰] Walton, D.R. and Kauffman, P.W., 1982. "Some Practical Considerations in Applying Geostatistics to Coal Reserve Estimation", SME-AIME, Dallas.
- [۱۱] Willam C, P. 1978. "Exploration And Mining Geology", John Wiley & Sons, Inc. 430-432.
- [۱۲] Annels, Alwyn E., 1996. "Mineral Deposit Evaluation: A Practical Approach", CHAPMAN & HALL, P. 436.
- [۱۳] Soltani-Mohammadi, S., A. Hezarkhani and A. Erhan Tercan, 2012. "Optimally locating additional drill holes in three dimensions using grade and simulated annealing", Journal of the Geological Society of India 80(5): 700-706.
- [۱۴] Hasel A.A., 1938. "Sampling error in timber surveys", Journal of Agricultural Research, vol. 57: 713-736.
- [۱۵] Mahalanobis P.C., 1940. "A sample survey of the acreage under jute in Bengal", Sankhys, vol. 4: 511-530.

دارد. کارایی این تابع هدف در مکان یابی بهینه گمانه های تکمیلی با استفاده از روش تبرید شبیه سازی شده در کانسار انگوران بررسی و ثابت شد. یکی از مزیت های این تابع هدف، نسبت به واریانس تخمین این است که علاوه بر وابستگی به پراکندگی داده ها، به عیار بخش های مختلف کانسار نیز وابسته است. پیش از این سلطانی و هزارخانی (۲۰۱۱) تلاش کرده بودند تا با استفاده از میانگین وزن دار واریانس کریجینگ نسبت به عیار، تأثیر عیار بلوک ها را در تابع هدف وارد سازند [۵]. بر اساس تابع هدف میانگین وزن دار، هرچه عیار بلوک بیشتر باشد کاهش واریانس تخمین ارزش بیشتری خواهد داشت. اما بر اساس معیار خطای کلاسه بندی هرچه اختلاف عیار تخمینی بلوک و عیار حد افزایش یابد، تأثیر کاهش واریانس تخمین بلوک در کاهش خطای کلاسه بندی کاهش یافته و در نتیجه ارزش کمتری در تابع هدف خواهد داشت. از آنجا که خطای کلاسه بندی اغلب در بلوک هایی اتفاق می افتد که عیار آن ها به عیار حد نزدیک است، تأثیر پارامتر عیار بلوک ها در نتایج بسیار مطلوب است. پیشنهاد می شود تا در ادامه مطالعات بیشتری در خصوص تطبیق دادن الگوریتم های مکان یابی با نیازهای اطلاعاتی مرحله طراحی معدن صورت پذیرد.

- [۳۲] Gorla, S., Armstrong, M. and Galli, A., 2002. "Using a Bayesian approach to incorporate new information when estimating resources", Proceedings of the International association for mathematical geology, Berlin.
- [۳۳] Hassanipak, A.A., Sharafodin, M., 2003. "GET: A Function for Preferential Site Selection of Additional Borehole Drilling", Exploration Mining Geology 13, pp. 139-146.
- [۳۴] Webster, R. and M. A. Oliver, 2007. "Geostatistics for Environmental Scientists", Wiley.
- [۳۵] Journel, A. G. and Huijbregts Ch. J., 1978, "Mining Geostatistics", Academic Press, New York/London, pp. 458, 462-4.
- [۳۶] Verly, G., 2005. "Grade Control Classification of Ore and Waste: A Critical Review of Estimation and Simulation Based Procedures", Mathematical Geology, 37(5), pp 451.
- [۳۷] Englund, E.J. and Heravi, N., 1993. "Conditional simulation: practical application for sampling design optimization", In Geostatistics Troia '92, ed. A. Soares, pp. 613-24. Kluwer, Dordrecht.
- [۳۸] Borg, G. and Daliran, F., 2005. "Genetic aspects of the Angouran non sulphide zinc ore deposit, NW-Iran as an exploration guide for non sulphide zinc ores, Mining and Sustainable Development", 20th World mining congress, Tehran, Iran.
- [۳۹] Boni, M., 2005. "Marble-hosted sulphide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposits, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex", Mineralium Deposita 1: 1-16.
- [۴۰] Quenouille M.H., 1949. "Problems in plane sampling", Annals of Mathematical Statistics, vol. 20: 355-375.
- [۴۱] Das A.C., 1950. "Two-dimensional systematic sampling and the associated stratified and random sampling", Sankhya, vol. 10: 95-108.
- [۴۲] Zubrzycki S., 1958. "Remarks on random, stratified and systematic sampling in a plane", Colloquium Mathematicum, vol. 6: 251-264.
- [۴۳] Drew, k J., 1974. "Estimation of Petroleum Exploration Success and the Effects of Resource Base Exhaustion via a Simulation Model. U.S. Geol. Survey Bull. v. 1328, 25p.
- [۴۴] Singer, D. A., and Wickmann, F. E., 1969. "Probability Tables for Locating Elliptical Targets with Square, Rectangular, and Hexagonal Point-Nets", Pennsylvania State Univ., Mineral Sci. Expt.Sta., Spec. Pub. 1-69, 100 p.
- [۴۵] Koch, G. S., Jr., and Link, R. F., 1974. "A Mathematical Model to Guide the Discovery of Ore Bodies in a Coeur d'Alene Lead-Silver Mine", U.S. Bur. Mines Rept. Inv. 7989, 43 p.
- [۴۶] Savinskii, I. D., 1965. "Probability Tables for Locating Elliptical Underground Masses with a Rectangular Grid", New York, Consultants Bureau, 110 p.
- [۴۷] Schuenemeyer, J. H., Bawiec, W. J., and Drew, L. L., 1980. "Computational Methods for a Three-Dimensional Model of the Petroleum-Discovery Process", Computers and Geosciences, v. 6, p. 323-360.
- [۴۸] Malmqvist, K., Malmqvist, L., and Zwiefel, H., 1980. "Computer Simulation of Simulation for Deep-Seated Orebodies in Mining Districts", Econ. Geol., v. 75, p. 927-935.
- [۴۹] Shurygin, A. M., 1976. "The Probability of Finding Deposits and Some Optimal Search Grids", Math Geol., v. 8, p. 323-330.
- [۵۰] Qahwash, A.-L. A., 1987. "An optimal algorithm for drilling strategy", Energy 12(6): 423-425.
- [۵۱] Kim, Y.C., Myers, D.E. and Kundson, H.P., 1977. "Advanced Geostatistics in Ore Reserve Estimation and Mine Planning", US Department of Energy, October.
- [۵۲] Gershon, M.E., 1983. "Optimal Drillhole Location Using Geostatistics", SME-AIME, Atlanta.
- [۵۳] Aspie, D., Barnes, R. J., 1990. "Infill-Sampling Design and the Cost of Classification Errors", Mathematical Geology, Vol. 22, No. 8, P. 915-932.
- [۵۴] Burger, H.; and Birkenhake, F., 1994. "Geostatistics and the polygonal method: A re-examination", In: International Association for Mathematical Geology (IAMG 95) Annual Conference, pp.50-55.
- [۵۵] Gorla, S., Armstrong, M., Galli, A., 2001. "Quantifying The Impact of Additional Drilling on an Openpit Gold Project", Proceedings of the International association for mathematical geology, Cancun, Mexique.