

(پژوهشی)

تخمین عیار در کانسارهای با تغییرات موضعی ناهمسانگردی به روش
کولونی مورچگان، مطالعه موردی: کانسار مس پورفیری میدوکحمید معینی^۱، فرهاد محمدتراب^{۲*}، امین حسین مرشدی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۸، پذیرش: شهریور ۱۳۹۸)

چکیده

ناهمسانگردی یا ناپیوستگی کانسار در جهت‌های مختلف به دلیل تغییرات عیار یا ساختار ماده معدنی پدید می‌آید. کنترل کننده‌های زمین‌ساختی یا تغییرات شیمیایی در حین تشکیل ماده معدنی می‌توانند سبب ناهمسانگردی شوند. این ویژگی به صورت سه‌بُعدی در کانسارها با یک بیضوی به قطرهای در راستای پیوستگی و با مقادیر متناسب با نسبت ناهمسانگردی تعریف می‌شود. در طبیعت اما، بسیاری از کانسارها تحت تاثیر فرآیندهایی مثل چین‌خوردگی، گسل، تغییرات زايشی و دگرگونی دچار تغییرات موضعی ناهمسانگردی (LVA) می‌شوند و نمی‌توان آنها را با یک بیضوی ناهمسانگردی کلی مدل کرد. در روش مدل‌سازی متغیر دارای خاصیت LVA، پارامترهای ناهمسانگردی برای هر سلول شبکه تخمین محاسبه شده و با تبدیل فضا به یک فضای همسانگرد، از فواصل جدید اقلیدسی در واریوگرافی و سپس کریجینگ معمولی (OK) استفاده شده است. این روش که کریجینگ LVA (OKLVA) نام گرفته، در صورت وجود اطلاعات ثانویه، می‌تواند با دقت بیشتری نسبت به کریجینگ سنتی، نقاط نامعلوم را تخمین بزند. در این پژوهش از الگوریتم کولونی مورچگان استفاده شده تا با هدایت هدفمند مورچه‌ها به کمک میدان LVA در مسیرهای پیوسته‌تر عیاری و تبدیل هر مورچه به یک پنجره میانگین متحرک، بتواند عیار را در مسیرهای ناهمسانگرد اصلاح کند. این کاربرد جدیدی از یک الگوریتم فرا ابتکاری است که تاکنون در حل مسائل بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شده است. این روش (ACLVA) از ابتدا تا انتها در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده و سپس روی ۱۲۹۵۵ نمونه کامپوزیت شده مغزه‌های حفاری معدن مس میدوک به عنوان نمونه مطالعاتی امتحان شد. نتایج با روش‌های OK و OK-LVA مقایسه شد. برای اعتبارسنجی هر سه روش از داده‌های چال‌های آتشفشانی استفاده شد که نشان داد روش تخمین با ACLVA تقریباً ۳ درصد بهتر از OK و ۴ درصد بهتر از OKLVA در تخمین عیار عمل کرده است. با این وجود، آنچه که مسلم است در ساختارهای با میدان موضعی پیچیده‌تر، جواب بهتر و قابل قبول تری با این روش به دست خواهد آمد.

کلمات کلیدی

LVA، کریجینگ، ناهمسانگردی، کولونی مورچگان، مس میدوک

* عهده‌دار مکاتبات: fntorab@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

مطالعات مربوط به مدل‌سازی کانسار یا تخمین ذخیره به کمک الگوریتم‌های هوش مصنوعی بیشتر مربوط به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و شبکه‌های تابع شعاع محور (RBF) است. شبکه‌های ANN ساختاری شبیه‌سازی شده از نورون‌های عصبی مغز انسان است که لایه‌هایی از آنها می‌تواند با اصول ارتباطی ساده، مسائل پیچیده‌ای را رمزگشایی کند. شبکه‌های RBF نیز در ساختار خود از توابعی کمک می‌گیرند که به شعاع جستجوی اطراف نورون‌ها وابسته‌اند و با تغییراتی ساده در اطراف خود و تعامل با اجزاء دیگر شبکه، قادر به حل مسائلی از جنس درون‌یابی هستند [۱].

تحقیقات مختلفی از ۱۹۹۳ تاکنون در رابطه با کاربرد شبکه‌های ANN و RBF در تخمین عیار یا ذخیره کانسارها انجام شده است [۸-۱]. در برخی از آنها دو شبکه با یکدیگر تلفیق شده‌اند [۹]. مقایسه تعدادی از روش‌های مذکور نشان داده که معماری شبکه و امکانات سخت‌افزاری موجود روی نتایج تاثیر زیادی دارد [۱۰، ۱۱]. یکی از مشکلات عمده اغلب شبکه‌های ANN، ضعف یادگیری شبکه با داده‌های کم است. طهماسبی شبکه عصبی ماژولی را برای تخمین عیار معدن آهن گل‌گهر معرفی کرد. شبکه مذکور در یک الگوریتم تکرارشونده با کاهش اتصال‌های بین نورون‌ها بر اساس کارایی نهایی، از پیچیدگی متداول محاسبات وزن‌ها کاسته و قادر به یادگیری با تعداد داده محدود بود. مشکلی که به ویژه در زمینه داده‌های اکتشافی تعیین ذخیره یک معدن وجود دارد [۱۲]. وی در تحقیق دیگری از الگوریتم ژنتیک (GA) برای بهینه‌سازی پارامترهای شبکه هیبریدی عصبی-فازی (CANFIS) در تخمین ذخیره استفاده کرد [۱۳].

کریجینگ، تخمین‌گری خطی است که با روش‌های زمین‌آماری، یک مقدار نامعلوم مکانی را با ضریب‌دهی به مقادیر معلوم اطرافش تعیین می‌کند به طوری که خطای تخمین کمینه شود. این روش در صورت وجود یک ناهمسانگردی کلی، از بسیاری از روش‌های تخمین بهتر عمل می‌کند اما اگر ناهمسانگردی در قسمت‌های مختلف فضای تخمین تغییر کند قادر به مدل کردن آن نیست. ویژگی مذکور، "تغییرات موضعی ناهمسانگردی" (LVA) نام دارد که ناشی از تغییر شرایط شیمیایی تشکیل کانسار

یا وجود کنترل‌کننده‌های ساختاری از قبیل گسل، درزه یا چین‌خوردگی بوده و غالباً در راستای امتداد یا منطبق بر مسیر حرکت محلول کانه ساز تغییر می‌کند. وجود این تغییرات موضعی به دلیل خاصیت غیرخطی، فرضیه پایایی را در شرایط معادلات کریجینگ نقض می‌کند.

برای واردکردن LVA یک کانسار در تخمین‌های زمین‌آماری تحقیقات مختلفی انجام شده است. از قبیل کریجینگ با جستجوی محلی [۱۴-۱۶]، استفاده از جهات متغیر موضعی با شبیه‌سازی طیفی یک بعدی [۱۷]، تبدیل‌های استراتیگرافی برای تبدیل فضای غیرخطی به خطی [۱۸]، استفاده از تغییرمقیاس چندبعدی برای تاثیر LVA در مدل‌سازی [۱۹]، استفاده از روش‌های کرنل (kernel) یا پنجره میانگین وزنی برای بررسی ساختارهای دارای LVA [۱۹-۲۱]، مدل‌سازی متغیرهای زیست‌محیطی با تعریف واحدی به نام فاصله رودخانه‌ای (stream distance) و استفاده از آن در روابط کریجینگ [۲۲-۲۵] و تهیه میدان ناهمسانگردی موضعی یا همان نقشه جامع جهت‌های LVA در سراسر شبکه تخمین [۲۶-۳۰]. در همه این موارد سعی شده تا با ساده‌سازی شرایط پیچیده طبیعی، ساختار غیرخطی ناهمسانگردی به مدلی ریاضی و قابل محاسبه تبدیل شود. گرچه بسیاری از این تلاش‌ها در نهایت به تخمین منجر نشده است.

بویس‌ورت (۲۰۰۸) روشی غیرخطی برای کریجینگ و شبیه‌سازی یک کانسار دارای LVA ارائه کرد. او با تبدیل شبکه تخمین به گراف، فواصل غیرخطی ناهمسانگردی را به فضای اقلیدسی چندبعدی همسانگرد تبدیل و از فواصل جدید در تخمین‌ها استفاده کرد [۳۲]. بویس‌ورت از روش پیشنهادی خود در تخمین عیار مس در یک کانسار پرفیری [۳۳]، تخمین ضخامت ماسه‌های نفتی آلبرتا [۳۲]، تخمین میزان انتشار گاز CO₂ در ایالات متحده آمریکا [۳۴] و در تحقیق مشترک با مارتین، جهت تعیین مرزهای مدل مورد استفاده در بازتولید ویژگی‌های زمین‌شناسی به کمک شبکه RBF [۳۵] استفاده کرده است. البته بعضی از پژوهش‌های مذکور صرفاً جنبه مطالعاتی داشته و با فرض میدان LVA با نسبت ناهمسانگردی ثابت انجام شده‌اند.

در این پژوهش با ترکیب الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان (AC) و میدان LVA یک کانسار، روشی به نام ACLVA برای مدل‌سازی زمین‌آماری آن ارائه شده است.

زمین‌آماری متغیر ناهمسانگرد به معنی تخمین در امتداد بیشترین پیوستگی است. اگر راستا و نسبت‌های ناهمسانگردی، در مکان‌های مختلف دامنه متغیر تصادفی، مدام در حال تغییر باشد، در آن صورت با یک ناهمسانگردی غیرخطی با تغییرات موضعی یا LVA مواجه هستیم که در روش‌های متداول زمین‌آماری ناقص فرضیات پایایی است.

در مبحث تخمین عیار ماده معدنی، متغیر تصادفی همان مقدار عنصر ژئوشیمیایی آنالیز شده در مغزه‌های حفاری اکتشافی است. برای تخمین عیار با استفاده از ACLVA ابتدا نیاز به (۱) تصویر یا همان مدل اولیه از توزیع عیار در فضای تخمین و (۲) میدان LVA آن است. میدان LVA که از این به بعد در این نوشته با میدان نام برده خواهد شد، پارامترهای ناهمسانگردی در هرکدام از سلول‌های فضای تخمین است. تصویر مذکور به دو منظور اساسی در الگوریتم استفاده می‌شود: (۱) جهت استنتاج میدان LVA و (۲) به عنوان فضای اولیه شروع حرکت مورچه‌ها و اصلاح الگوی توزیع مکانی عیار به نحوی که منطبق با میدان بوده و پیوستگی‌های عیاری بارزتر شوند. برای تولید تصویر اولیه، کریجینگ بلوکی غیرجهتی بهترین گزینه است [۳۲]. زیرا برای تولید میدان نیاز به یک تصویر هموار^۲ از کانسار است تا ایده‌ای کلی از ناهمسانگردی کانسار به دست دهد. تصویر هموار یا همان بلوک‌های پرشده با عیارهای درونیایی‌شده، در تولید میدان با روش خودکار لیلا و بوپس‌ورت استفاده می‌شود [۳۱].

دو روش برای تولید خودکار میدان پیشنهاد شده است: (۱) ممان اینرسی و (۲) مولفه‌های اصلی گرادیان. هر دو روش از یک پنجره متحرک انطباقی استفاده می‌کنند که در یک الگوریتم تکراری بر روی تصویر اولیه حرکت داده می‌شود. پارامترهای ناهمسانگردی سلول‌های پنجره در هر دو روش با تجزیه مقادیر ویژه دو تنسور به دست می‌آیند. اولین تنسور، ممان اینرسی نقشه کوواریانس مقادیر سلول‌های پنجره [۲۸] و دومین تنسور، گرادیان مقادیر سلول‌های واقع در پنجره است. ابعاد پنجره، از یک اندازه اولیه تا یک بیشینه تغییر می‌کند و در نهایت، مناسب‌ترین پارامترهای ناهمسانگردی به سلول مرکزی پنجره منطبق می‌شود (برای اطلاع از جزئیات به [۳۱] رجوع شود).

فاصله ناهمسانگردی یکی از مفاهیم کلیدی است که بین دو نقطه ۱ و ۲ به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

در واقع با استفاده از یکی از کاربردهای AC [۳۶] و هدایت مورچه‌ها از طریق مسیرهای ناهمسانگردی، پیوستگی‌های ویژگی مورد نظر (عیار ماده معدنی) بارزتر شده و تخمین‌ها در مسیرهای پیوسته‌تر اصلاح می‌شوند. در نهایت پس از تکرار هدفمند الگوریتم، نقشه نهایی توزیع عیار به دست خواهد آمد. تاکنون از الگوریتم‌های هوش ازدحامی که زیرمجموعه الگوریتم‌های فراابتکاری هستند در بسیاری از حوزه‌های علوم مرتبط با بهینه‌سازی سیستم‌ها مثل کامپیوتر، برق، رباتیک استفاده شده است. اما این نخستین کاربرد چنین روش‌هایی در تخمین ذخیره یک کانسار است. روش مذکور پس از طراحی و کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB روی ۱۲۹۵۵ نمونه کامپوزیت شده حفاری اکتشافی معدن مس میدوک در استان کرمان اجرا شد. سپس شبکه بلوک‌های مورد استفاده در ACLVA با روش‌های کریجینگ معمولی (OK) و کریجینگ LVA (OKLVA) نیز تخمین زده شد و مقادیر تخمینی هر سه روش با داده‌های نمونه‌گیری شده از چال‌های آتشیاری اعتبارسنجی شد. نتایج نشان‌دهنده بهبود تخمین ACLVA نسبت به OK و OKLVA است. به نظر می‌رسد با توجه به ماهیت روش OKLVA و استفاده از میدان تولید شده به روش خودکار، در صورتی که اطلاعات دقیق‌تری از پارامترهای ناهمسانگردی به شکل برداشت‌های ساختاری درون چالی وجود داشته باشد نتایج بسیار بهتری نسبت به OK خواهد داشت. با این وجود، روش ACLVA با توجه به عدم نیاز به واریوگرافی و شرایط حساس و تخصصی آن، با سرعت و کیفیت بهتری به نتیجه می‌رسد.

۲- معرفی روش

ناهمسانگردی در حالت کلی (سه‌بعدی) با یک بیضوی نمایش داده می‌شود که قطرهای آن در راستای ناهمسانگردی و نسبت دو قطر به قطر بزرگ معادل نسبت‌های ناهمسانگردی هستند. امتداد بزرگ‌ترین قطر در جهت بیشترین و امتداد کوچک‌ترین قطر در جهت کم‌ترین پیوستگی متغیر مکانی مورد نظر است. بدین ترتیب بر اساس معیار نامگذاری نرم‌افزار GSLIB [۳۷]، ناهمسانگردی با ۵ پارامتر شامل سه جهت dip , $strike$ و $plunge$ در راستای سه قطر a_{max} , a_{vert} , a_{min} بیضوی و دو نسبت $r_1(\frac{a_{min}}{a_{max}})$ و $r_2(\frac{a_{vert}}{a_{max}})$ مشخص می‌شود که در حالت دوبعدی به $strike$ و r_1 کاهش می‌یابد. مدل‌سازی

شناسایی شده و مسیرهای غیربهمینه با تبخیر فرومون، از بین می‌روند. با افزایش غلظت فرومون در طول زمان، فقط یک یا چند مسیر بهمینه تقویت خواهد شد که همان پاسخ‌های نهایی مسئله است [۳۸].

مهم‌ترین نکته در این الگوریتم، احتمال انتخاب مسیر از سلول i به j توسط هر مورچه است که به صورت رابطه (۲) قابل پیاده‌سازی به زبان ماشین است [۳۶]:

$$p_{ij} = \frac{\phi_{ij}^{\alpha} d_{ij}^{\beta}}{\sum_{i,j=1}^n \phi_{ij}^{\alpha} d_{ij}^{\beta}} \quad \forall j \in A; j \notin TL_k \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\alpha \geq 0$ و $\beta \geq 0$ پارامترهای تاثیر هستند. ϕ_{ij} غلظت فرومون مسیر و d_{ij} میزان جذابیت همان مسیر است که می‌تواند هر رابطه دلخواه ابتکاری بسته به نوع کاربرد الگوریتم باشد. A مجموعه‌ای از سلول‌های مجاور موقعیت فعلی مورچه k ام و TL_k تعداد سلول‌های ممنوعه‌ای است که مورچه k ام در صورتی که یکبار به آنها سر زده است مجاز به انتخاب مجدد آنها نیست [۳۶]. فرمول ابتکاری که در این تحقیق برای ACLVA طراحی شده عبارتست از:

$$\alpha = 1; \beta = 2; \quad (3)$$

$$d_{ij} = \left(2 - \frac{\sum |lva(\theta)_i - lva(\theta)_j|}{s} \right) * (2 - lva(r)_j)$$

که $lva(\theta)_i$ پارامترهای جهت‌های ناهمسانگردی (*dip*، *strike* و *plunge*) میدان در سلول فعلی و $lva(r)_j$ نسبت ناهمسانگردی سلول بعدی است. S فاکتور استانداردسازی است که معادل ۵۴۰ در حالت میدان سه‌بعدی و ۳۶۰ در حالت دو بعدی است. با کمک این رابطه ابتکاری، حرکت مورچه‌ها در امتداد بیشترین پیوستگی‌ها هدایت می‌شود و احتمال انتخاب سلول بعدی در صورت هم‌جهت بودن میدان آن بیشتر خواهد شد. به این ترتیب، α و β از مجموعه پارامترهای ورودی برنامه، خارج می‌شوند.

در هر تکرار الگوریتم، مقداری از فرومون مسیرها تبخیر می‌شود. زمانی که همه مورچه‌ها مسیرهایشان را طی کردند مقادیر فرومون مسیر سلول i به سلول j در تکرار t مطابق رابطه (۴) به روز می‌شود:

$$\phi_{ij}(t+1) = \rho \phi_{ij}(t) + \Delta \phi_{ij}(t) \quad (4)$$

$$d_{12} = \sqrt{\left(\frac{dx}{ax}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ay}\right)^2 + \left(\frac{dz}{az}\right)^2} \quad (1)$$

که d_x فاصله دو نقطه و a_x قطر بیضوی ناهمسانگردی در راستای x است. هر چه a در یک راستا بیشتر باشد، فاصله بین دو نقطه در آن راستا نیز کمتر خواهد شد [۳۲]. بنابراین برای محاسبه کمترین فاصله بین نقاط در صورت وجود LVA، باید از مسیرهای غیرخطی عبور کرد که منطبق بر بیشترین پیوستگی است. این امر سبب می‌شود نتوان از این نوع فاصله در محاسبات معمول زمین‌آماری مثل OK استفاده کرد چرا که دیگر منطبق بر فاصله اقلیدسی نبوده و فرضیات پایایی را نقض می‌کند.

برای غلبه بر این مشکل، بویس‌ورت الگوریتم OKLVA را پیشنهاد کرد که به طور خلاصه عبارتست از هم‌ارز کردن فضای میدان با یک گراف و سپس محاسبه کوتاه‌ترین فاصله بین L گره (دلخواه) از گراف با روش‌های عددی مثل دیکسترا یا جبهه پیش‌رونده سریع. گره‌ها مراکز سلول‌ها و یال‌ها فواصل ناهمسانگردی بین آنها هستند. فاصله‌های محاسبه‌شده با استفاده از الگوریتم L-ISOMAP که یکی از بهترین الگوریتم‌های MDS است، به فضای اقلیدسی نگاشت می‌شوند. فضای جدید که همسانگرد شده است، واریوگرافی غیرجهتی شده و مدل تابع کوواریانس آن به دست می‌آید. از تابع کوواریانس و فاصله‌های جدید در روابط کریجینگ معمولی استفاده شده و نقاط نامعلوم شبکه تخمین، محاسبه می‌شوند (برای اطلاع از جزئیات رجوع شود به [۳۲]).

روش پیشنهادی ACLVA در واقع مبتنی بر الگوریتم بهمینه‌سازی کولونی مورچگان دوریگو طراحی شده است که یکی از الگوریتم‌های هوش ازدحامی فراابتکاری است. اصول چنین روش‌هایی برگرفته از طبیعت بوده و مبتنی بر تراکنش بین یک گروه از عوامل متحرک است که با استفاده از یک رابط ساده برای رسیدن به یک هدف تلاش می‌کنند. در الگوریتم مورچگان، هدف یافتن کوتاهترین مسیر دست‌یابی به غذا است. غذا در مورد نقشه توزیع عیار، بیشترین مقدار عیار است. رابط ساده نیز ماده شیمیایی به نام فرومون است که توسط مورچه‌ها در مسیر حرکتشان ریخته می‌شود. مورچه‌ها به طور تصادفی مسیرهایی را دنبال می‌کنند تا به غذا برسند. مسیرهایی که میزان فرومون آن بیشتر است به مرور توسط مورچه‌های دیگر

تصادفی بین هر دو سلول مجاور را کم کند. اگر بیشینه اختلاف مقادیر عیار بین موقعیت فعلی مورچه و سلول‌های اطرافش کمتر از حد نوسان شود، مورچه موقعیت تصادفی دیگری را در شبکه برای حرکت بعدی انتخاب خواهد کرد [۳۶].

در هر بار تکرار الگوریتم، مورچه‌ها مانند پنجره‌های متحرک میانگین عمل کرده و عیار سلول‌های مسیرشان را تغییر می‌دهند. مقادیر نهایی سلول‌ها، پیوستگی بیشتری در امتداد ناهمسانگردی‌های موضعی خواهد داشت. کل فرایند می‌تواند چندین بار تکرار شود تا اثرات تصادفی ذاتی الگوریتم خنثی شود. در این صورت، مقادیر نهایی سلول‌ها بر تعداد تکرارها تقسیم می‌شود و خروجی نهایی، تصویر اصلاح شده توزیع ماده معدنی در کل فضای تخمین خواهد بود.

۳- مطالعه موردی: کانسار مس میدوک

معدن مس میدوک در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال شرق شهر بابک و ۱۳۲ کیلومتری شمال غرب معدن مس سرچشمه در استان کرمان قرار گرفته است. ریخت‌شناسی منطقه، تپه ماهورهای نسبتاً مدوری است که با شیب ملایم به دره‌های کم‌عمق می‌رسد. محدوده مس میدوک دارای دو توده نفوذی کم عمق مس پورفیری است که کارگاه اصلی معدن در ۷ کیلومتری شمال غرب روستای میدوک قرار دارد. منطقه میدوک قسمتی از کمربند فلززایی زون ولکانیکی-پلوتونیک ارومیه- دختر ایران است که از نظر زمین‌شناسی قسمتی از سیستم کوه‌زایی آلپ- هیمالیا است و کانسار مس سرچشمه و بسیاری کانسارهای مس پورفیری دیگر در آن واقع است (شکل ۱). رخساره سنگ‌شناسی غالب در این ناحیه، سنگ‌های گوناگون آذرآوری (با ترکیب ریولیتی تا آندزیت بازالتی)، گدازه‌های جریان، سنگ‌های آهکی و ماسه‌سنگ متعلق به ائوسن است. سنگ میزبان اصلی کانسار میدوک، یک استوک گرانودیوریتی است که سنگ‌های آندزیتی منطقه آن را احاطه کرده است (شکل ۱). مشخص‌ترین سیماهای اغلب ذخایر هیدروترمال پورفیری، زون‌های دگرسانی آن است که توسط سیالات هیدروترمال ایجاد شده و با نظم خاصی در اطراف توده معدنی قرار می‌گیرند. در بسیاری از موارد همراهی مشخصی بین این زون‌ها و کانی‌زایی دیده می‌شود.

ρ ضریب تبخیر است که در بازه $[0,1]$ قرار می‌گیرد. $\Delta\phi_{ij}(t)$ میزان اثر فرومونی است که همه m مورچه به روز می‌کنند:

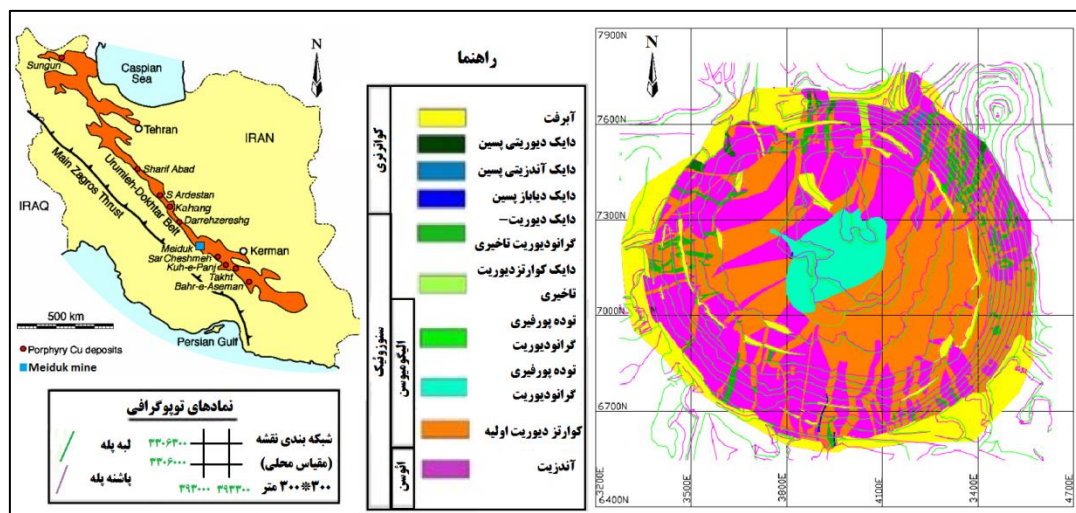
$$\Delta\phi_{ij}(t) = \sum_k^m \Delta\phi_{ij}^k(t) \quad (5)$$

و $\Delta\phi_{ij}^k(t)$ اثر فرومون به روز شده مورچه k ام است اگر از سلول i به سلول j برود و مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\Delta\phi_{ij}^k(t) = \frac{1}{L_k} \quad (6)$$

L_k طول مسیری است که مورچه k ام پیموده است و هرچه کوتاه‌تر باشد اثر فرومون در آن ماندگارتر است [۳۶]. روش کار به این صورت است که در ابتدا m مورچه به طور تصادفی در سلول‌های غیرتهی شبکه تخمین که همان تصویر اولیه است قرار داده می‌شوند و هم‌زمان یک مقدار فرومون اولیه بسیار کم به مسیر بین سلول‌ها اختصاص داده می‌شود. m کمتر یا مساوی کل سلول‌های غیرتهی تصویر است. سپس مورچه‌ها شروع به حرکت کرده و سلول‌های مجاور خود را طبق رابطه (۲) کنترل کرده و بهترین سلول بعدی را انتخاب می‌کنند. پس از هر تکرار، شدت اثر فرومون که تابعی از تعداد مورچه‌ها است، در مسیرهای پیموده شده به روز می‌شود. مقدار به روز شده، تابع اختلاف عیار سلول مجاور با فعلی مورچه و نیز تعداد مورچه‌هایی است که مسیر بین دو سلول را پیموده‌اند. برای جلوگیری از تکرار انتخاب سلول در حین فرایند جستجو، هر مورچه سلول‌های پیموده شده را به حافظه خود می‌سپارد. تعداد این سلول‌ها با پارامتر TL_k یا تعداد سلول‌های ممنوعه مورچه k تعیین می‌شود که عدد آن بسته به رفتار عیار سلول‌ها دارد؛ اگر توزیع فضایی عیارها رفتاری آشفته داشته باشد، TL_k باید کم باشد تا تغییرات عیار در فرایند جستجوی مورچه نادیده گرفته نشود و همه سلول‌ها بررسی شوند. وقتی مورچه‌ها در شبکه ثابت شدند به معنی این است که در سلول‌های با عیار بالا تجمع کرده‌اند. تثبیت مورچه‌ها یا رسیدن به تعداد تکرار مورد نظر، باعث توقف برنامه می‌شود [۳۶].

در یک تصویر اولیه، نوسان‌های بسیار ضعیف عیارهای درون‌یابی شده در مجاورت یک سلول می‌تواند نشان‌دهنده یک تغییر تصادفی باشد که باید در انتخاب مسیر یک مورچه نادیده گرفته شود. بنابراین، یک حد نوسان به صورت یک آستانه در برنامه تعریف می‌شود تا تاثیر تغییرات



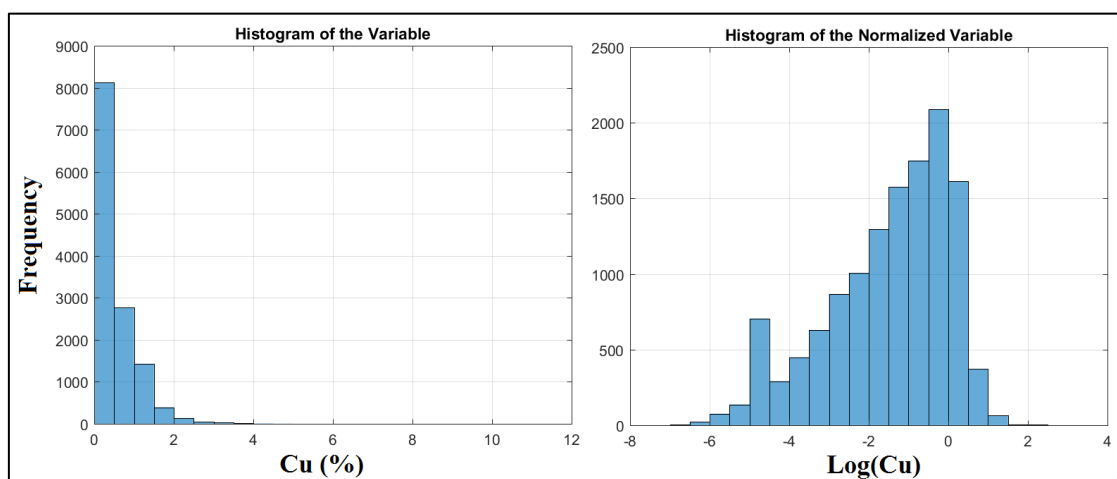
شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی و موقعیت معدن مس میدوک در کمربند ارومیه-دختر

و هیپوژن) و وجود تغییرات محلی عیار، توزیع عیار این کانسار در بسیاری از قسمت‌ها خاصیت LVA دارد و به همین جهت قابل بررسی با روش‌های ذکر شده است. داده‌های حفاری پس از کامپوزیت کردن به ۱۲۹۵۵ نمونه تبدیل شد. آمار توصیفی (جدول ۱) و هیستوگرام داده‌های خام (شکل ۲) بررسی، و با تبدیل لگاریتمی، نرمال شدند. توزیع فضایی نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

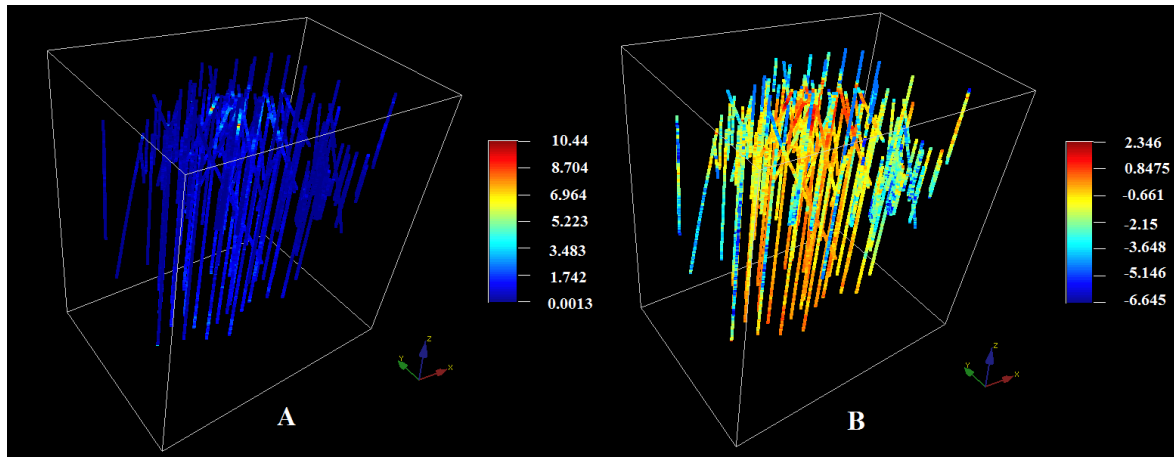
داده‌های استفاده شده در این پژوهش مربوط به اطلاعات ۹۵ گمانه اکتشافی حفر شده در کانسار مس پورفیری میدوک است. با استفاده از این داده‌ها توده معدنی مورد اکتشاف به سه روش OK، OKLVA و ACLVA تخمین زده شد و به منظور اعتبارسنجی، نتایج با داده‌های حفاری چال‌های آتشفشانی که جهت بهره‌برداری بلوک‌های استخراجی، برداشت شده بود مقایسه شد. با توجه به زون بندی کانسار (وجود زون‌های اکسید و شسته شده، سوپرژن

جدول ۱: آمار توصیفی داده‌های خام و نرمال شده

کشفیدگی	چولگی	چارک سوم	میان	چارک اول	واریانس	میانگین	بیشینه	کمینه
۲۴/۱۵۶	۲/۷۶۹	۰/۷۶۹	۰/۳۰۹	۰/۰۸۵	۰/۳۰۷	۰/۴۹۶	۱۰/۴۴۵	۰/۰۰۱۳
۲/۷۶۵	-۰/۷۲۷	-۰/۲۶۲	-۱/۱۷۲	-۲/۴۶۵	۲/۶۹	-۱/۵۰۴	۲/۳۴۶	-۶/۹۴۵



شکل ۲: هیستوگرام داده‌های خام (چپ) و نرمال شده (راست) مس میدوک



شکل ۳: توزیع فضایی نمونه‌های کامپوزیت شده خام (A) و نرمال شده (B)

۴- تخمین

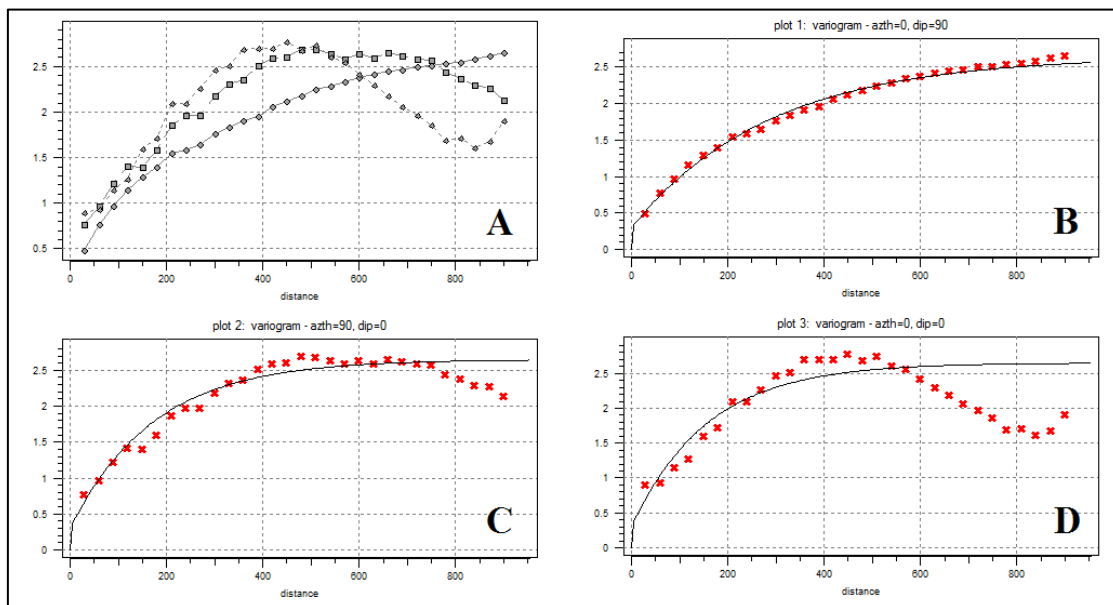
سپس یک شبکه تخمین به تعداد $50 \times 35 \times 17$ سلول با ابعاد هر سلول $25 \times 25 \times 15$ متر در امتداد $x \times y \times z$ ایجاد شد. جهت سادگی محاسبات، مختصات شبکه به مختصات محلی با مبدا $(0, 0, 0)$ تبدیل شد. این شبکه در هر سه روش با همین مشخصات استفاده شد. شکل ۵ نمایی از سلول‌های تخمین خورده به روش OK را نشان می‌دهد که با مقادیر واقعی (چال‌های آتشیاری) همان سلول‌ها مقایسه شده‌اند. ضریب همبستگی در این روش، عدد 0.796 را نشان می‌دهد.

۴-۱- تخمین به روش OK

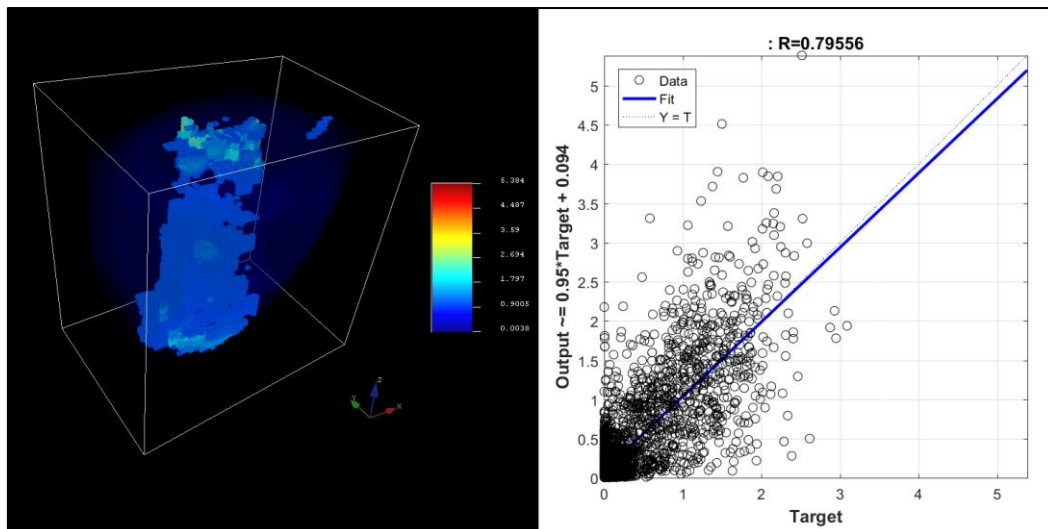
ابتدا واریوگرام تجربی ناهمسانگرد داده‌ها محاسبه و یک مدل نمایی به آن برازش داده شد (شکل ۴). مشخصات تابع نمایی برازش شده به آن طبق جدول ۲ است. زوایا بر حسب درجه و دامنه‌ها بر حسب متر است. سقف واریوگرام، $2/65$ است.

جدول ۲: مشخصات مدل تئوری برازش شده به واریوگرام تجربی

مدل	Nugget(% ²)	Contribution(% ²)	a_{max}	a_{vert}	a_{min}	Strike	Dip	Plunge
نمایی	۰/۳	۲/۳۵	۸۷۳	۵۴۹	۴۵۹	۰	-۸۰	۰



شکل ۴: واریوگرام تجربی ناهمسانگرد در سه راستای متعامد و مدل نمایی برازش شده به آن؛ (A) در یک شکل؛ (B) آزیموت صفر، شیب ۹۰؛ (C) آزیموت ۹۰، شیب صفر؛ (D) آزیموت صفر، شیب صفر

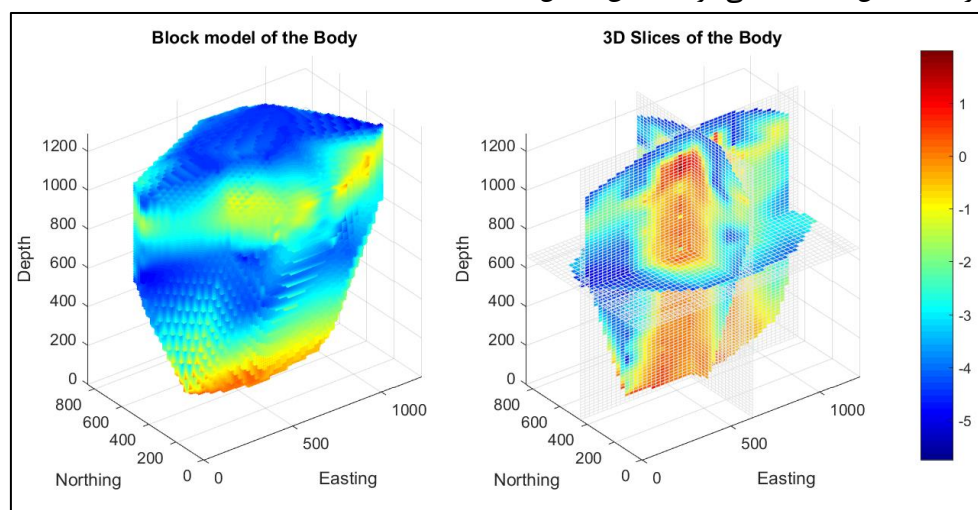


شکل ۵: چپ: بلوک‌های تخمین خورده به روش OK (برای بهتر دیده شدن وضعیت تغییرات عیار در بلوک‌های داخلی، بلوک‌های بیرونی با عیارهای پایین کمرنگ تر شده اند)؛ راست: اعتبارسنجی تخمین با چال‌های آتشیاری

۴-۲- تخمین به روش OKLVA

مجموعه‌ای از پارامترهای ناهمسانگردی عیاری ماده معدنی است که در هر کدام از سلول‌های شبکه، برآورد شده‌اند. برای تولید تصویر و میدان آن، از کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

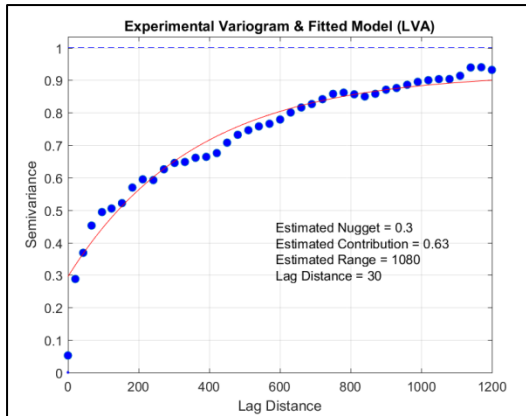
ابتدا یک تصویر اولیه سه‌بعدی از داده‌های نرمال آماده شد (شکل ۶). سپس با روش خودکار ممان اینرسی، میدان LVA تصویر مذکور تولید شد (شکل ۷). همان‌طور که در قسمتی از جزئیات شکل ۷ دیده می‌شود، میدان شامل



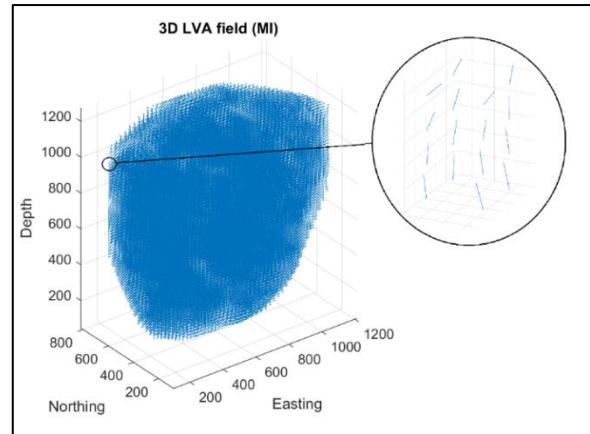
شکل ۶: تصویر هموار اولیه که برای تولید میدان استفاده شده است

ماتریس فاصله‌های فضای جدید، OKLVA در شبکه طراحی شده قبلی انجام و تخمین‌ها با چال‌های آتشیاری اعتبارسنجی شد (شکل ۹). با این روش، ضریب همبستگی بین تخمین‌ها و عیارهای واقعی (چال‌های آتشیاری) عدد ۰/۷۸۵ را نشان می‌دهد. تمام مراحل کار از واریوگرافی تا کریجینگ به کمک دو کد اجرایی انجام شده است.

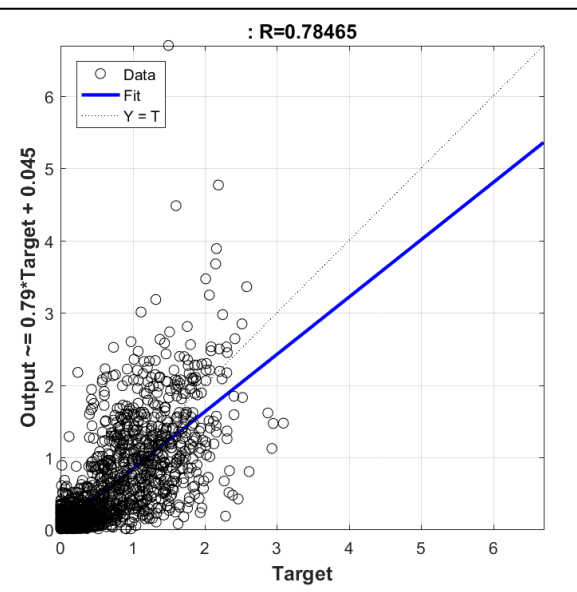
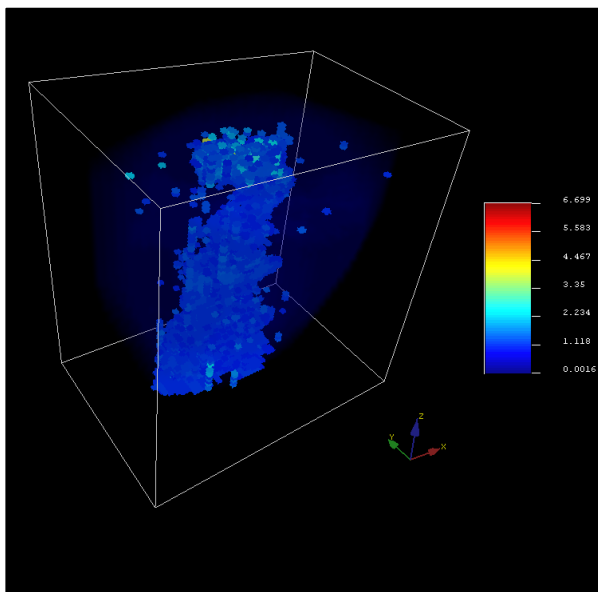
با استفاده از میدان تولید شده (شکل ۷)، ماتریس کوتاه‌ترین فاصله‌های ناهمسانگردی محاسبه و سپس به روش L-ISOMAP، به فاصله‌های اقلیدسی تبدیل شد. با این کار، فضای تخمین به یک فضای همسانگرد تبدیل می‌شود. در مرحله بعد، واریوگرافی تجربی در فضای جدید همسانگرد انجام شده و مدل نمایی به آن برازش داده شد (شکل ۸). سرانجام، به کمک پارامترهای مدل کوواریانس و



شکل ۸: واریوگرام تجربی و مدل برازش شده به آن در فضای جدید اقلیدسی



شکل ۷: میدان LVA تولید شده به روش ممان اینرسی و جزئیات قسمتی از آن در هر بلوک

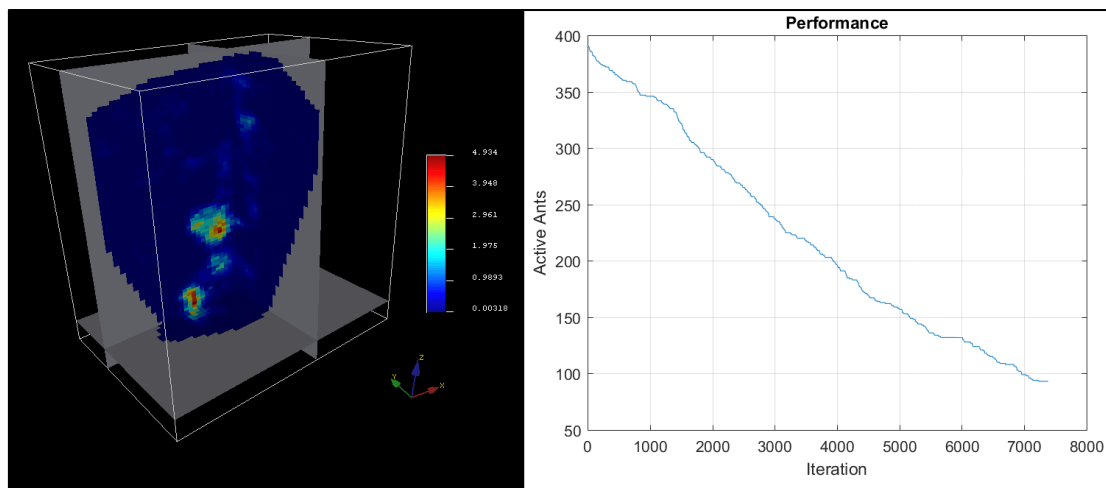


شکل ۹: چپ: بلوک‌های تخمین خورده به روش OKLVA (برای بهتر دیده شدن وضعیت تغییرات عیار در بلوک‌های داخلی، بلوک‌های بیرونی با عیارهای پایین کمرنگ تر شده‌اند)؛ راست: اعتبارسنجی تخمین با چال‌های آتشیاری

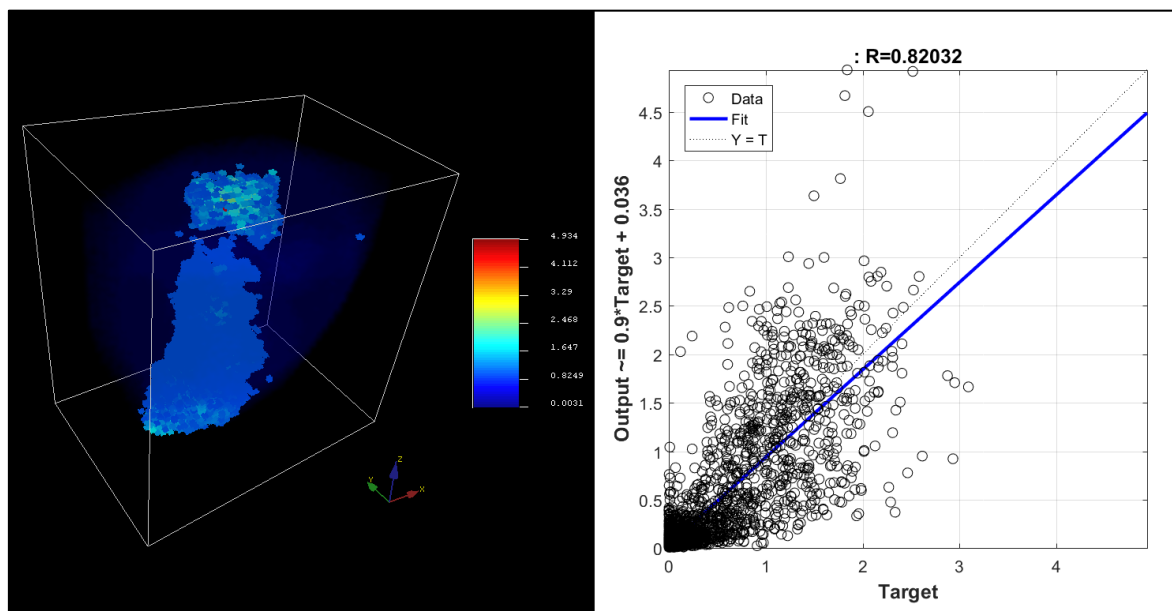
۴-۳- تخمین به روش ACLVA

در این روش از تصویر اولیه ماده معدنی (شکل ۶) و میدان LVA (شکل ۷) استفاده شد و با طراحی الگوریتم کولونی مورچگان در نرم‌افزار MATLAB و افزودن ماژول‌هایی برای شناسایی مسیرهای ناهمسانگردی، مقادیر تصویر اولیه به طور هوشمند اصلاح شد. به همین دلیل دو پارامتر α و β در رابطه (۲) به طور خودکار محاسبه می‌شوند. بیشینه تعداد تکرار نیز ۱۰۰۰۰ تعیین شد که بر طبق مکانیزمی که در برنامه گنجانده شد به دلیل تثبیت مورچه‌ها قبل از رسیدن به بیشینه تکرار، برنامه متوقف می‌شود. بقیه پارامترها که پس از سعی و خطا و مقایسه خروجی با عیارهای کنترلی به دست آمد عبارتند از: ۱-

ضریب تبخیر فرمون (۰/۰۵)، ۲- تعداد مورچه‌ها (۳۸۶)، ۳- مقدار فرمون اولیه (۰/۱)، ۴- تعداد سلول‌های ممنوعه (۵۰)، ۵- حد نوسان (۰/۰۱) و ۶- تعداد دفعات تکرار کل الگوریتم برای کاهش تاثیر حرکت تصادفی مورچگان (۴). بهترین خروجی برنامه با ۶ پارامتر فوق پس از تثبیت مورچه‌ها (نمودار شکل ۱۰) در بلوک‌های هدف (شکل ۱۰ راست) و توقف برنامه، منجر به تخمین بلوک‌ها با عیارهای منطبق با ناهمسانگردی شد (شکل ۱۱). در این مورد، ضریب همبستگی عیارهای تخمینی با عیارهای واقعی (چال‌های آتشیاری) در همان بلوک‌ها، عدد ۰/۸۲ را نشان می‌دهد که حاکی از عملکرد بهتر این روش نسبت به دو روش قبلی است.



شکل ۱۰: نمودار عملکرد الگوریتم در تثبیت مورچه‌ها و توقف برنامه در آخرین تکرار (راست) و برشی از میانگین تجمع مورچه‌ها در بلوک‌ها در هنگام توقف برنامه پس از آخرین تکرار (چپ)



شکل ۱۱: چپ: بلوک‌های تخمین خورده به روش *ACLVA* (برای بهتر دیده شدن وضعیت تغییرات عیار در بلوک‌های داخلی، بلوک‌های بیرونی با عیارهای پایین کمرنگ تر شده‌اند)؛ راست: اعتبارسنجی تخمین با چال‌های آتشیاری

۵- نتیجه‌گیری

شبکه تخمین است. به کمک میدان مذکور، فاصله‌های ناهمسانگردی در شبکه تخمین محاسبه شده و پس از انتقال به یک فضای جدید، به فاصله‌های اقلیدسی تبدیل می‌شوند. از این فاصله‌های جدید در واریوگرافی و سپس تخمین به روش کریجینگ معمولی استفاده می‌شود.

در این مقاله از ترکیب الگوریتم کولونی مورچگان (AC) و میدان LVA استفاده شده و روشی برای تخمین عیار ماده معدنی دارای ویژگی LVA ارائه شده است. این روش به همراه روش‌های OK و OKLVA روی داده‌های حفاری اکتشافی معدن مس پورفیری میدوک اجرا شده و نتایج تخمین‌ها با عیارهای واقعی (چال‌های آتشیاری)

تخمین عیار یک توده معدنی که خاصیت LVA از خود نشان می‌دهد، یکی از چالش‌های مدل‌سازی زمین‌آماري است که تاکنون محققین مختلف سعی در ارائه روش‌های عملی برای حل آن کرده‌اند. یکی از آخرین روش‌ها توسط بویس‌ورت ارائه شده است و توسط نامبرده کدهایی به منظور واریوگرافی، کریجینگ و شبیه‌سازی در فضای میدان LVA منتشر شده است. روش مذکور علاوه بر مقادیر نمونه‌ها، نیاز به میدان LVA دارد. میدان LVA عبارت از پارامترهای ناهمسانگردی در هر کدام از سلول‌های

منابع

- [1] Wu X, Zhou Y, (1993). "Reserve estimation using neural network techniques", *Comput Geosci* 19, pp567-575
- [2] Kapageridis IK, (1999). "Application of artificial neural network systems to grade estimation from exploration data", University of Nottingham
- [3] Koike K, Matsuda S, Suzuki T, Ohmi M, (2002). "Neural network-based estimation of principal metal contents in the Hokuoku district, northern Japan, for exploring Kuroko-type deposits", *Nat Resour Res* 11, pp135-156
- [4] Koike K, Matsuda S, (2003). "Characterizing content distributions of impurities in a limestone mine using a feedforward neural network", *Nat Resour Res* 12, pp209-222
- [5] Samanta B, Bandopadhyay S, Ganguli R, Dutta S, (2005). "An application of Neural networks to gold grade estimation in Nome Placer Deposit", *J South African Inst Mine, Met* 105, pp237-246
- [6] A.A Morshedy HM, (2015). "A New Method of Generalized Radial Basis Function Network to Interpolate Regional Variable in Geosciences", *J Geosci* 24, pp107-116
- [7] Dutta S, Misra D, Ganguli R, Samanta B, Bandopadhyay S, (2006). "A hybrid ensemble model of kriging and neural network for ore grade estimation", *Int J Surf Mining, Reclam Environ* 20, pp33-45
- [8] Nezamolhosseini SA, Mojtahedzadeh SH, Gholamnejad J, (2017). "The Application of Artificial Neural Networks to Ore Reserve Estimation at Choghart Iron Ore Deposit", *J Analytical Numer Methods Min Eng* 6, pp73-83
- [9] Kapageridis I, Denby B, (1998). "Ore grade estimation with modular neural network systems-a case study", *Inf Technol Miner Ind Ed by GN Panagiotou TN Michalakopoulos AA Balkema Publ Rotterdam* pp52
- [10] Kapageridis IK, (2002). "Artificial neural network technology in mining and environmental applications", *11th Int. Symp. Mine Plan. Equip. Sel.*
- [11] Samanta B, Bandopadhyay S, Ganguli R, (2006). "Comparative evaluation of neural network learning algorithms for ore grade estimation", *Math Geol* 38, pp175-197
- [12] Tahmasebi P, Hezarkhani A, (2011). "Application of a modular feedforward neural network for grade estimation", *Nat Resour Res* 20, pp25-32
- [13] Tahmasebi P, Hezarkhani A, (2012). "A hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic

اعتبارسنجی شده‌اند. نتایج حاکی از بهبود ۴ درصدی تخمین با ACLVA نسبت به OKLVA و ۳ درصدی نسبت به OK است.

یکی از مهم‌ترین موارد الگوریتم هیبریدی ACLVA تنظیم پارامترهای اولیه آن است که مثل هر روش مشابه در یادگیری ماشین، تنها با سعی و خطا می‌توان به بهترین ترکیب برای بالاترین راندمان خروجی دست یافت. گرچه در روش پیشنهادی در این تحقیق، سه پارامتر مهم آن به طور خودکار در برنامه تنظیم می‌شوند. از بین بقیه پارامترها، تعداد سلول‌های ممنوعه و ضریب تبخیر فرمون از اهمیت بیشتری برخوردارند. بقیه پارامترها را می‌توان به صورت پیش فرض ۰/۱ برای مقدار فرمون اولیه و ۱۰۰۰۰ برای بیشینه تکرار، بدون تغییر در هر مورد استفاده کرد. مقدار پارامتر حد نوسان، عددی کمتر از اختلاف بین کمترین عیارهای مورد تخمین انتخاب می‌شود. پارامتر تعداد مورچه‌ها می‌تواند حداکثر به تعداد سلول‌های غیرتهی باشد. با این وجود، در این الگوریتم از مجذور تعداد سلول‌های غیرتهی به عنوان تعداد بهینه پیشنهادی [۳۶] استفاده شده است که در مقایسه با تعداد مورچه‌های مختلف نتایج قابل قبولی داشته است. استفاده از تعداد بهینه مورچه سبب کاهش حافظه پردازش و افزایش سرعت محاسبات می‌شود. از محاسن این الگوریتم عدم نیاز به واریوگرافی داده‌های اولیه است.

گرچه در این روش، میدان LVA به طور اتوماتیک و از روی تغییرپذیری محلی عیار محاسبه و در الگوریتم استفاده شده است، ولی وجود اطلاعات تکمیلی مانند اطلاعات ساختاری و کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی مثل برداشت شیب و امتداد گسل‌ها و رگه‌ها در مغزه‌های حفاری و دایک و چین‌خوردگی می‌تواند در تولید دقیق‌تر میدان محلی، کمک شایانی نماید. تولید میدان ناهمسانگردی دقیق در هر بلوک می‌تواند تخمین‌های کریجینگ به روش LVA را قطعاً نسبت به روش کریجینگ سنتی بهبود بخشد. الگوریتم استفاده شده در روش کلونی مورچگان نیز از همین میدان بهره می‌گیرد و میدان LVA صحیح قطعاً در افزایش دقت تخمین به این روش نیز موثر خواهد بود. این روش برای تمام تیپ‌های کانی‌سازی به ویژه تیپ‌های پیچیده و مرتبط با ساختار از جمله رگه‌ای از اولویت بیشتری برخوردار است.

- [29] Machuca-Mory DF, Rees H, Leuangthong O, (2013). "Grade Modeling with Local Anisotropy Angles: A Practical Point of View",
- [30] Hristopulos DT, (2002). "New anisotropic covariance models and estimation of anisotropic parameters based on the covariance tensor identity", *Stoch Environ Res Risk Assess* 16, pp43–62
- [31] Lillah M, Boisvert JB, (2015). "Inference of locally varying anisotropy fields from diverse data sources", *Comput Geosci* 82, pp170–182
- [32] Boisvert J, (2010). "Geostatistics with Locally Varying Anisotropy", University of Alberta
- [33] Boisvert JB, Deutsch C V, (2011). "Programs for kriging and sequential Gaussian simulation with locally varying anisotropy using non-Euclidean distances", *Comput Geosci* 37, pp495–510
- [34] Boisvert JB, Deutsch C V, (2011). "Modeling locally varying anisotropy of CO2 emissions in the United States", *Stoch Environ Res Risk Assess* 25, pp1077–1084
- [35] Martin R, Boisvert JB, (2017). "Iterative refinement of implicit boundary models for improved geological feature reproduction", *Comput Geosci* 109, pp1–15
- [36] Chen Y, An A, (2016). "Application of ant colony algorithm to geochemical anomaly detection", *J Geochemical Explor* 164, pp75–85
- [37] Clayton V, Deutsch AGJ, (1997). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide* (Applied Geostatistics Series). 2nd ed. Oxford University Press, USA
- [38] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A, (1996). "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Trans Syst Man, Cybern Part B* 26, pp29–41
- algorithm for grade estimation", *Comput Geosci* 42, pp18–27
- [14] Deutsch C V, Lewis R, (1992). "Advances in the practical implementation of indicator geostatistics", In: *Proc. 23rd Int. APCOM Symp.* pp 133–148
- [15] Xu W, (1996). "Conditional curvilinear stochastic simulation using pixel-based algorithms", *Math Geol* 28, pp937–949
- [16] Stroet C, Snepvangers J, (2005). "Mapping curvilinear structures with local anisotropy kriging", *Math Geol* 37, pp635–649
- [17] Yao T, Calvert C, Jones T, Foreman L, Bishop G, (2007). "Conditioning geologic models to local continuity azimuth in spectral simulation", *Math Geol* 39, pp349–354
- [18] Mallet JLL, (2002). *Geomodeling*. Oxford University Press, Inc.
- [19] Sampson P, Guttorp P, (1992). "Nonparametric estimation of nonstationary spatial covariance structure", *J Am Stat Assoc* 87, pp108–119
- [20] Higdon D, (1998). "A process-convolution approach to modelling temperatures in the North Atlantic Ocean", *Environ Ecol Stat* 5, pp173–190
- [21] Nott DJ, Dunsmuir W, (2002). "Estimation of nonstationary spatial covariance structure", *Biometrika* 89, pp819–829
- [22] VerHoef JM, Peterson E, Theobald D, (2006). "Spatial statistical models that use flow and stream distance", *Environ Ecol Stat* 13, pp449–464
- [23] Little LS, Edwards D, Porter DE, (1997). "Kriging in estuaries: as the crow flies, or as the fish swims?", *J Exp Mar Bio Ecol* 213, pp1–11
- [24] Rathbun SL, (1998). "Spatial modeling in irregularly shaped regions: kriging estuaries", *Environmetrics* 9, pp109–129
- [25] Yuan LL, (2004). "Using spatial interpolation to estimate stressor levels in unsampled streams", *Environ Monit Assess* 94, pp23–38
- [26] Ganio LM, Torgersen CE, Gresswell RE, (2005). "A geostatistical approach for describing spatial pattern in stream networks", *Front Ecol Environ* 3, pp138–144
- [27] Renard D, Ruffo P, (1993). "Depth, dip and gradient", In: *Geostatistics Tróia'92*. Springer, pp 167–178
- [28] Mohammadhassanpour R, (2007). "Tools for multivariate modeling of permeability tensors and geometric parameters for unstructured grids", *Masters Abstr. Int.* 46:

¹ Locally Varying Anisotropy² smooth