

## کاربرد شبکه برنامه‌ریزی GERT در ساختار مدیریت پروژه‌های شبیه‌سازی زمین آماری در کانسار مس - طلا دالی شمالی استان مرکزی

سجاد طالش حسینی<sup>۱</sup>، علی مرادزاده<sup>۲\*</sup>، امید اصغری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران؛ Sajjad.t.hosseini@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران؛ a\_moradzadeh@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران؛ O.asghari@ut.ac.ir

### چکیده

از آنجا که در کارهای اکتشافی تعداد داده‌های برداشت شده نسبت به مساحت منطقه مورد مطالعه بسیار کوچک تر می‌باشد، لذا یافتن ابزاری قوی جهت مدل‌سازی فضایی نهشته کانساری با توجه به نقاط محدود برداشت شده بسیار مورد اهمیت است. با توجه به ویژگی کانسار مورد مطالعه، الگوریتم‌های مختلف شبیه‌سازی زمین آماری با توانایی تولید مدل‌های مختلفی از نهشته‌های کانساری جهت حل این مشکل ارائه شده است. وجود یا عدم وجود چولگی زیاد داده‌های اکتشافی برداشت شده در منطقه مورد مطالعه، دلیلی برای انتخاب یکی از روش‌های شبیه‌سازی شاخص متوالی (SIS) و یا شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) می‌تواند باشد. در این مقاله با توجه به نوع فعالیت‌های مورد بررسی از شبکه برنامه‌ریزی ارزیابی و بازنگری گرافیکی پروژه (گرت) جهت مدیریت پروژه اکتشافی و ایجاد الگویی مناسب در استفاده از روش‌های شبیه‌سازی گوسی متوالی و شاخص متوالی استفاده شد. جهت پیاده‌سازی فعالیت‌های احتمالی شبکه طراحی شده، از داده‌های لیتوژئوشیمیایی نهشته مس - طلا پورفیری منطقه دالی شمالی استفاده شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی SIS بر روی داده‌های طلا (به دلیل چولگی بالا) با نتایج شبیه‌سازی SGS بر روی داده‌های مس (به دلیل چولگی کم) حاکی از همبستگی بالای این دو عنصر و وجود یک ذخیره مس - طلای پورفیری با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی در منطقه دالی شمالی است. وجود این امتداد کانی‌سازی در شواهد زمین‌شناسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی را اثبات نموده است.

### کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی زمین آماری، شبیه‌سازی شاخص متوالی، شبیه‌سازی گوسی متوالی، شبکه برنامه‌ریزی گرت، نهشته مس - طلا پورفیری.

## ۱- مقدمه

مورد استفاده الگوریتم‌های متفاوتی وجود دارد. تمام این الگوریتم‌ها یک هدف مشترک بازتولید داده‌های اولیه و برگرداندن واریانس از دست رفته در روش کریجینگ را دارند [۱۰]. مهمترین خاصیت شبیه‌سازی زمین‌آماری این است که به جای بهترین تخمین، مجموعه‌ای از مدل‌های ممکن را تولید می‌کند و لذا دامنه‌ای از حالت‌های ممکن را می‌تواند به نمایش بگذارد. به طور کلی هدف تخمین، محاسبه پارامترهای تابع توزیع احتمال بر اساس داده‌های موجود است، در صورتی که در شبیه‌سازی هدف بازسازی برخی از حالات ممکن بر اساس پارامترهای تابع توزیع احتمال، واریوگرام و یا کوواریوگرام موجود است [۱۱-۱۳].

شبیه‌سازی‌های گوسی و شاخص متوالی از جمله روش‌های متداول در زمینه مدل‌سازی کانسار معدنی هستند [۹]. روش شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) ساده‌ترین روش در تولید توابع توزیع تجمعی شرطی است [۱۴-۱۶]. تبدیل داده‌های اکتشافی با چولگی زیاد به توزیع نرمال سبب ایجاد تغییر ویژگی داده‌ها می‌شود. با توجه به الگوریتم روش SGS، این روش در مورد داده‌ها با چولگی زیاد مناسب نیست [۱۷-۱۹]. در این موارد، روش شبیه‌سازی شاخص متوالی (SIS) به عنوان یکی دیگر از الگوریتم‌های متداول شبیه‌سازی استفاده می‌شود [۱۰، ۱۷، ۲۰]. الگوریتم روش SIS نسبت به روش SGS دارای پیچیدگی بیشتری بوده و دارای محاسبات بیشتری است.

به منظور ایجاد یک نگرش کلی از نحوه استفاده دو روش شبیه‌سازی گوسی و شاخص متوالی جهت مدل‌سازی نهشته مس- طلا پورفیری منطقه دالی شمالی از شبکه برنامه‌ریزی استفاده شد. با توجه به این موضوع که در این بررسی با فعالیت‌های احتمالی روبرو هستیم، لذا این روش‌های شبیه‌سازی توسط روش برنامه‌ریزی ارزیابی و بازنگری گرافیکی (GERT) شبکه شده‌اند. هدف از این مطالعه، مشخص نمودن الگوریتم مناسب جهت شبیه‌سازی عناصر مس و طلا با توجه به ویژگی این متغیرها است. در این مقاله، برای اولین بار از یک

مجموعه‌ای از فعالیت‌ها که در زمان معین و با هزینه معین و کیفیت خاص برای رسیدن به هدفی انجام می‌شوند را پروژه می‌گویند [۱]. برای رسیدن به هدف مورد نظر در یک پروژه نیاز به یک برنامه‌ریزی مناسب و دقیق است. برای این منظور، روش‌های مشخصی وجود دارند که با توجه به ماهیت فعالیت‌های درگیر در یک پروژه از آنها استفاده می‌شود [۱، ۲]. فعالیت‌ها براساس احتمال اجرای آنها، به دو گروه احتمالی و معین تقسیم‌بندی می‌شوند. فعالیت‌های احتمالی که در یک پروژه از قبل احتمال وقوع آنها مشخص نیست در پروژه‌های مختلف معدنی قابل مشاهده هستند. روش مسیر بحرانی (CPM)<sup>۱</sup>، به عنوان یکی از روش‌های برنامه‌ریزی پروژه، در پروژه‌های فاقد فعالیت و زمان‌های احتمالی مناسب است. همچنین روش‌های دیگر جهت برنامه‌ریزی پروژه‌ها شامل روش ارزیابی و بازنگری پروژه‌ها (PERT)<sup>۲</sup> و روش گرافیکی ارزیابی و بازنگری پروژه‌ها (GERT)<sup>۳</sup> به ترتیب در پروژه‌ها با فعالیت‌های قطعی اما زمان اجرای احتمالی و در پروژه‌ها با فعالیت‌های غیر قطعی و احتمالی استفاده می‌شوند. در واقع ماهیت پروژه‌ها شامل نوع فعالیت و زمان نقش اصلی را در انتخاب روش برنامه‌ریزی دارد [۱-۴]. طراحی یک شبکه برنامه‌ریزی در یک پروژه تخمین و شبیه‌سازی زمین‌آماری با توجه به وجود الگوریتم‌های متفاوت در این روش‌ها، می‌تواند در انتخاب الگوریتم مناسب براساس ویژگی متغیر مورد بررسی کمک نماید [۱، ۴-۸].

استفاده از روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری بر روی داده‌های برداشت شده محدود می‌تواند دید کاملی از وضعیت نهشته کانساری در یک منطقه را بازگو نماید. وجود اثر هموارسازی در روش کریجینگ به دلیل دادن مقداری از واریانس داده‌ها، باعث مطرح شدن روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری شد [۹]. در این روش‌ها براساس هدف و نوع داده

1- Critical Path Method

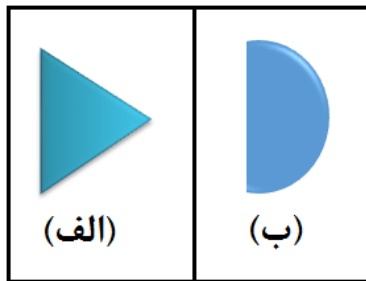
2- Project Evaluation &amp; Review Technique

3- Graphical Evaluation &amp; Review Technique

4- Sequential Gaussian Simulation

5- Sequential Indicator Simulation

همچنین در روش گرت برای نشان دادن خروجی هر رویداد از دو شکل استفاده می‌شود (شکل ۲). علامت احتمالی نشان دهنده تحقق تنها یک فعالیت از فعالیت‌های منشعب از گره است (شکل ۲-الف). همچنین علامت قطعی به معنی تحقق تمامی فعالیت‌های منشعب شده از گره است (شکل ۲-ب) [۲۱].



شکل ۲- نمادهای خروجی رویدادها در شبکه برنامه‌ریزی گرت  
[۲-۳، ۵-۷، ۲۱]

در شبکه برنامه‌ریزی گرت می‌توانیم بین فعالیت‌ها رابطه حلقه‌ای (سیکلی) داشته باشیم. با وجود حلقه در این نوع از شبکه‌ها، فعالیت‌ها می‌توانند چندین بار تکرار شوند.

#### ۲-۲- شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS)

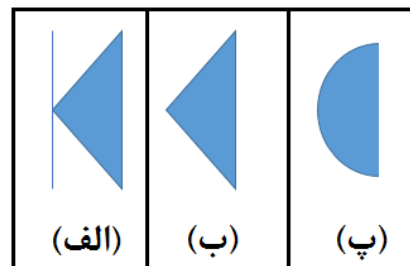
این روش، برای محیط‌هایی که در آن پیوستگی متغیر نسبت به طبقه‌بندی آن از اهمیت بیشتری برخوردار است، به‌کار می‌رود [۱۲، ۲۲]. لذا پایایی داده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجا که اولین شرط مورد نیاز جهت پایایی، نرمال بودن داده‌ها است، در نتیجه در روش‌های موجود در این دسته، از داده‌هایی با توزیع نرمال و با استاندارد نرمال استفاده می‌شود [۱۱-۱۳]. این روش یکی از پرکاربردترین و انعطاف‌پذیرترین روش‌های شبیه‌سازی در صنعت معدن است. الگوریتم این روش در ساده‌ترین بیان به این صورت است که در ابتدا منطقه مورد مطالعه شبکه‌بندی می‌شود. سپس یک مسیر تصادفی به گونه‌ای که از تمام نقاط شبکه بلوک‌ها بگذرد، انتخاب می‌شود. برای تمام نقاط که به ترتیب در این مسیر تصادفی قرار گرفته‌اند با استفاده از روش کریجینگ ساده یک تابع توزیع تجمعی ایجاد

روش برنامه‌ریزی جهت مدیریت انتخاب روش مناسب در ساختار پروژه‌های شبیه‌سازی‌های زمین آماری استفاده شد.

#### ۲- روش‌شناسی

##### ۱-۲- روش ارزیابی و بازنگری گرافیکی پروژه

در بعضی از پروژه‌ها فعالیت‌های تعریف شده به طور کامل اجرا نمی‌شوند و یا بعضی از فعالیت‌های آن‌ها به صورت ناقص و برخی از آن‌ها بیش از یک‌بار اجرا می‌گردند. جهت برنامه‌ریزی این قبیل از پروژه‌ها روش گرت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲-۳]. این شبکه برنامه‌ریزی ترکیبی از روش برنامه‌ریزی ارزیابی و بازنگری پروژه‌ها، توابع مولد گشتاور<sup>۱</sup> و تئوری فلوگراف<sup>۲</sup> است. روش گرت دارای حجم محاسباتی کم و راندمان محاسباتی بالا بوده و دارای کاربرد بیشتر نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد. در این روش برای نشان دادن ورودی هر رویداد از سه شکل متفاوت استفاده می‌شود (شکل ۱) [۲، ۵-۷]. علامت یای خاص<sup>۳</sup> زمانی استفاده می‌شود که وقوع هر یک از فعالیت‌های اصلی باعث وقوع رویداد شده و در هر لحظه از زمان یک و فقط یک فعالیت واصله می‌تواند اجرا شود (شکل ۱-الف). تفاوت علامت یای عام<sup>۴</sup> با حالت قبل در این است که در یک لحظه بیش از یک فعالیت واصله می‌تواند در حال اجرا باشد (شکل ۱-ب). همچنین علامت و<sup>۵</sup> زمانی استفاده می‌شود که کلیه فعالیت‌های واصله به اتمام برسند (شکل ۱-پ) [۲-۳، ۲۱].



شکل ۱- نمادهای ورودی رویدادها در شبکه برنامه‌ریزی گرت  
[۲-۳، ۵-۷، ۲۱]

- 1- Moment-Generating Functions
- 2- Flow Graph Theory
- 3- Exclusive OR
- 4- Inclusive OR
- 5- And

بررسی استفاده می‌شود [۱۷، ۲۳-۲۴]:

$$i(u_{\alpha}; k) = \begin{cases} 1, & \text{اگر طبقه‌بندی } k \text{ در موقعیت } u_{\alpha} \text{ باشد,} \\ 0, & \text{در غیر صورت} \end{cases} \quad (1)$$

که  $k$  تعداد طبقه‌بندی‌ها و  $u_{\alpha}$  موقعیت نقطه مورد بررسی است. نقشه‌های حاصل از تخمین و شبیه‌سازی این داده‌ها به صورت احتمال می‌باشد. در دسته دوم، داده‌های پیوسته که دارای چگالی زیاد هستند و تبدیل آنها به توزیع نرمال نتایج متفاوتی را ایجاد می‌نماید داده‌ها به حدآستانه‌های مختلف شکسته شده و بررسی در هر حدآستانه محاسبه خواهد شد. در این صورت جهت بررسی از رابطه زیر استفاده خواهد شد [۱۰، ۲۳-۲۴]:

$$i(u_{\alpha}; k) = \begin{cases} 1, & Z \leq z_1 \\ 0, & \text{در غیر صورت} \end{cases} \quad (2)$$

مقدار  $Z_1$  در واقع مقدار حدآستانه تعیین شده برای داده‌ها است. در نتیجه می‌توان مراحل اصلی این حالت از روش شاخص را به صورت زیر تعریف نمود [۱۰، ۱۷، ۲۳-۲۴]:

- ۱- تبدیل داده‌های پیوسته به کدهای شاخص (۰ و ۱) براساس حدآستانه‌های تعریف شده
- ۲- آماده کردن واریوگرام‌های شاخص برای هر حدآستانه
- ۳- شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه و انتخاب یک مسیر تصادفی جهت انجام محاسبات
- ۴- تخمین هر یک از نقاط با استفاده از روش کریجینگ شاخص و محاسبه واریانس تخمین برای هر کدام از حدآستانه‌ها
- ۵- تشکیل تابع توزیع تجمعی با استفاده از مقدار تخمینی و واریانس تخمین نقطه‌های تخمین زده شده برای هر کدام از حدآستانه‌ها
- ۶- بیرون کشیدن نقاط تصادفی و جمع کردن آن با مقدار تخمینی به عنوان شبیه‌سازی نقطه انتخابی در هر حدآستانه
- ۷- تکرار مراحل ۳ تا ۶ برای شبیه‌سازی تمام تحقق‌ها
- ۸- تبدیل داده‌های حاصل از شبیه‌سازی به توزیع پیوسته

می‌گردد. سپس از این توزیع یک مقدار انتخاب و به عنوان عیار به آن نقطه اختصاص داده می‌شود. این عملیات دوباره تکرار شده تا تمام نقاط موجود بر روی این مسیر شبیه‌سازی شود. مراحل اصلی انجام این روش را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود [۱۱-۱۳، ۲۲]:

- ۱- تبدیل داده‌ها با چولگی نسبتاً کم به توزیع نرمال
  - ۲- انجام واریوگرافی جهت تعیین پارامترهای پنجره جستجو با استفاده از داده‌های نرمال
  - ۳- شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه و انتخاب یک مسیر تصادفی جهت انجام محاسبات
  - ۴- تخمین هر یک از نقاط با استفاده از روش کریجینگ ساده
  - ۵- تشکیل تابع توزیع تجمعی با استفاده از مقدار تخمینی و واریانس تخمین نقطه تخمین زده شده
  - ۶- بیرون کشیدن نقاط تصادفی و جمع کردن آن با مقدار تخمینی به عنوان شبیه‌سازی نقطه انتخابی
  - ۷- تکرار مراحل ۳ تا ۶ برای شبیه‌سازی تمام تحقق‌ها
  - ۸- تبدیل داده‌های حاصل از شبیه‌سازی به توزیع اصلی
- ۲-۳- روش شبیه‌سازی شاخص متوالی (SIS)

این روش برای داده‌هایی که ماهیت دودویی<sup>۱</sup> دارند، استفاده می‌شود. مهم‌ترین خاصیت روش شبیه‌سازی شاخص متوالی غیر از حفظ داده‌های معلوم، ایجاد مجموعه‌ای از تصاویر ناحیه شاخص، شامل محدوده‌ای از حالت‌های ممکن و درصد احتمال رویداد است [۱۰، ۱۷، ۲۳-۲۴]. این روش از کریجینگ شاخص برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند و نیاز به مدل واریوگرام برای حدود مختلفی که از طرف کاربر مشخص می‌شوند، دارد. استفاده از شبیه‌سازی شاخص برای بدست آوردن توزیع یک متغیر در حدهای مختلف و یا متغیرهای قابل تقسیم‌بندی مناسب می‌باشد [۱۷، ۲۳]. به طور کلی داده‌های مورد بررسی در این روش به دو گروه تقسیم می‌شوند. دسته اول داده‌های گسسته مانند داده‌های مورد بررسی برای انواع رخساره‌ها<sup>۲</sup> هستند. برای این داده‌ها از رابطه زیر جهت

1- Binary  
2- Facies

نقشه‌های حاصل از تخمین و شبیه‌سازی این داده‌ها به صورت داده‌های پیوسته می‌باشند. در واقع پس از تخمین و شبیه‌سازی بر روی هر یک از حدآستانه‌های تعریف شده در حالت دوم، لازم است تا با ایجاد ارتباط بین همه حدآستانه‌ها، داده‌ها به حالت پیوسته بازگردانده شده و مقدار عیار در هر سلول نشان داده شود. با استفاده از رابطه (۳)، پس از انجام کریجینگ شاخص بر روی هر کدام از حدآستانه‌ها با توجه به مقدار میانه هر کدام از بازه‌ها ( $m_i$ ) و مقدار تخمینی هر پیکسل ( $Z_i^*(u)$ )، داده‌ها به حالت پیوسته تبدیل خواهند شد. پس از شبیه‌سازی هر کدام از حدآستانه‌ها در فضای گسسته، به علت ایجاد تحقق‌های مختلف نحوه بازگشت به فضای پیوسته بسیار اهمیت دارد. در نرم‌افزارهای زمین‌آماري از قبیل SGeMS، برای ساده‌تر شدن محاسبات از رابطه (۳) برای تحقق‌های نظیر به نظیر در حدآستانه‌های مختلف استفاده می‌شود. مطابق شکل ۳، برای بالا بردن افزایش دقت می‌توان رابطه ۳ را برای هر تحقق از یک حدآستانه با تحقق‌های متفاوت حدآستانه‌های دیگر تعمیم داد.

$$Z_i^{**} = \sum_{i=1}^n m_i \times Z_i^*(u) \quad (3)$$

### ۳- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

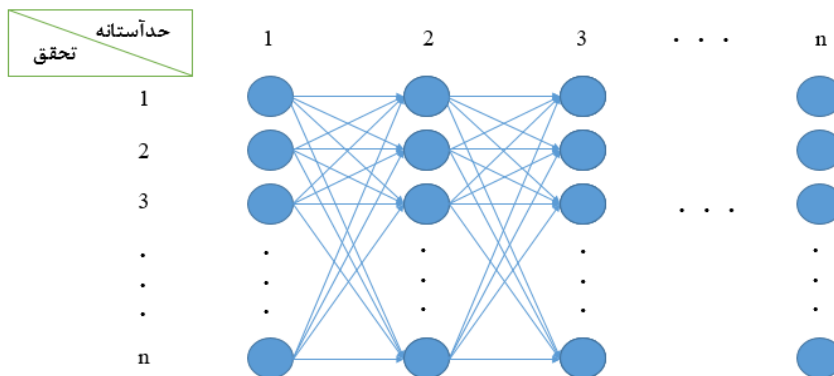
کانسار پورفیری بر روی کمر بند ارومیه - دختر در قسمت‌های مرکزی ایران قرار گرفته است. در واقع، منطقه دالی در استان مرکزی (۷۰ کیلومتری اراک) و در نزدیکی تقاطع جاده اراک با بزرگراه تهران - اصفهان واقع شده است (شکل ۴). این منطقه دارای طول جغرافیایی  $19^\circ E$  و  $50^\circ$  و عرض جغرافیایی  $16^\circ N$  و  $34^\circ$  می‌باشد [۲۵]. کانی‌سازی مس - طلا پورفیری در دو محدوده تپه دالی جنوبی و شمالی که به فاصله  $1/7$  کیلومتری از یکدیگر با روند شمال شرقی قرار دارند (شکل ۴). توپوگرافی نرم تا صاف در کف دره به صورت تدریجی به زمین شیب‌داری در دامنه دره می‌رسد. ارتفاع در کف دره از  $1950$  تا  $2210$  متر بالای سطح دریا تغییر می‌کند. محدوده اندیس دالی عمدتاً شامل سنگ‌های آذرین درونی دیوریت الیگومیوسن و ولکانیکی

آندزیتی ائوسن بوده که تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال دچار دگرسانی‌های نوع پتاسیک، پروپلیتیک، سیلیسی و بطور محلی فلیک شده‌اند (شکل ۴). کانی‌سازی مس و طلا در رابطه با آلتراسیون‌های پتاسیک (در سنگ‌های QDP) و سیلیسی (در سنگ‌های دیوریت و کنتاکت آن با آندزیت) می‌باشد. کانی‌سازی مس اساساً همراه با آلتراسیون پتاسیک و به مقدار کمتر با آلتراسیون سرسیت همراه می‌باشد (شکل ۴). کانه‌های اصلی شامل طلا - برنیت - کالکوپیریت (مولیبدنیت) می‌باشد. در هسته غنی از Au-Cu (به همراه برنیت یا کالکوپیریت فراوان) همراه با هاله پیریت در اطراف می‌باشد (در برخی از ذخایر برنیتی یک منطقه حلقوی کالکوپیریتی وجود دارد) [۲۵]. بررسی‌ها بر روی ۱۴۹ داده لیتوژئوشیمیایی برداشت شده از سطح محدوده مورد مطالعه انجام گرفت (شکل ۵). روش آنالیز این نمونه‌ها جهت بدست آوردن غلظت عناصر ICP-MS بوده که برای ۴۵ عنصر در شرکت ALS Chemex کانادا انجام شده است.

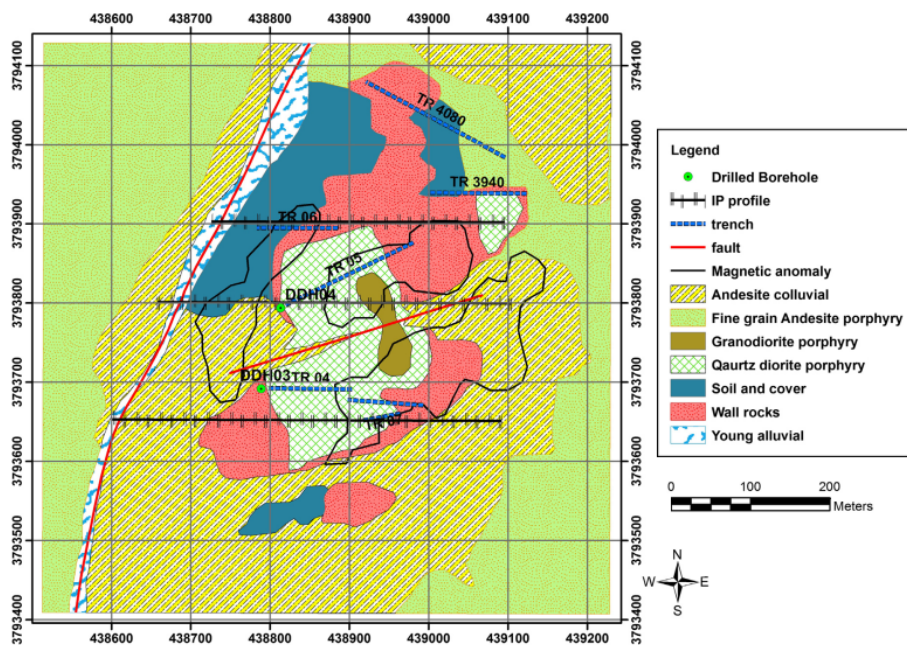
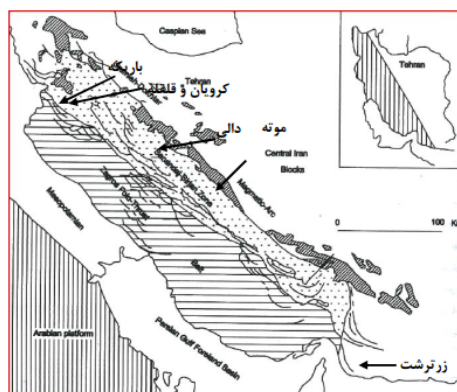
### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- طراحی شبکه برنامه‌ریزی گرت (GERT)

هدف اکتشافی در منطقه مورد مطالعه بررسی نهشته مس و طلا است. در مرحله شبیه‌سازی این دو عنصر با توجه به توزیع متفاوت آنها نیاز به روش‌های شبیه‌سازی متفاوتی می‌باشد. لذا با طراحی یک شبکه برنامه‌ریزی گرت جهت شبیه‌سازی عنصر طلا از روش شاخص متوالی (چولگی زیاد) و برای شبیه‌سازی عنصر مس از روش گوسی متوالی (چولگی کم) استفاده شد (شکل ۶). در این شبکه فعالیت اول نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها (A) بوده و پس از آن عناصر براساس توزیع آن‌ها به دو شاخه تقسیم می‌شوند. در صورتی که چولگی داده‌ها کم باشد (B1) از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی و در غیر این صورت (B2) از روش شبیه‌سازی شاخص متوالی استفاده خواهد شد. براساس الگوریتم روش شبیه‌سازی گوسی متوالی، داده‌های ورودی در ابتدا به گوسی نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک (C1) تبدیل خواهند شد.



شکل ۳- روش پیشنهادی تبدیل داده‌های گسسته به پیوسته با تعمیم هر تحقق از یک حدآستانه با تحقق‌های حدآستانه‌های دیگر

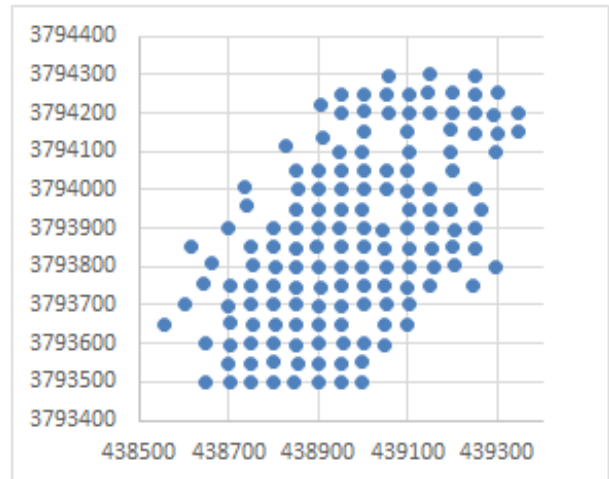


شکل ۴- نقشه جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه دالی شمالی [۲۵]

حالت پیوسته به گسسته انتخاب خواهد شد (C2) و سپس براساس هر یک از حدآستانه‌های تعریف شده مقادیر کوچک‌تر از آن‌ها کد یک (C3, C5, C7, C9 و C11) و مقادیر بزرگ‌تر از آنها کد صفر (C4, C6, C8, C10 و C12) دریافت خواهند کرد. براین اساس به تعداد حدآستانه‌های تعریف شده، مجموعه داده‌های صفر و یک وجود خواهند داشت که بر روی هر یک از آنها جهت تعیین پارامترهای بهینه بیضی جستجو واریوگرافی انجام می‌شود (D2, D3, D4, D5 و D6). همانند الگوریتم قبل، شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه (E2, E3, E4, E5 و E6) و انتخاب نقطه و مسیر تصادفی (F2, F3, F4, F5 و F6) در ابتدا انجام خواهد شد. در هر یک از نقاط تصادفی انتخابی پس از محاسبه تخمین (G2, G3, G4, G5 و G6) و واریانس تخمین (H2, H3, H4, H5 و H6) با توجه به مقدار میانگین و واریانس بدست آمده برای هر نقطه (مقدار تخمین و واریانس آن) تابع توزیع تجمعی آن رسم شده (I2, I3, I4, I5 و I6) و از این تابع توزیع یک نقطه به تصادف خارج می‌شود (J2, J3, J4, J5 و J6). با جمع کردن مقدار تصادفی خارج شده با مقدار تخمینی نقطه اول شبیه‌سازی شده (K2, K3, K4, K5 و K6) و با شبیه‌سازی تمام نقاط به ترتیب قرارگیری در مسیر تصادفی یک تحقق ایجاد خواهد شد (N2, N3, N4, N5 و N6). همانند روش گوسی متوالی، در این روش نیز حلقه‌های L2, L3, L4, L5, L6, M2, M3, M4, M5 و M6 ایجاد خواهد شد. با توجه به تحقق‌های مختلف ایجاد شده برای هر حدآستانه در ابتدا داده‌ها به حالت پیوسته بازگردانده شده (O1) و در میان تحقق‌های مختلف با استفاده از مقایسه پارامترهای میانگین و انحراف معیار و پارامترهای واریوگرافی تحقق‌های مختلف و داده اولیه شبیه‌سازی مناسب انتخاب می‌شود (O).

#### ۴-۲- شبیه‌سازی گوسی و شاخص متوالی غلظت مس - طلا

مطابق شکل ۷، چولگی کم عنصر مس و چولگی زیاد طلا سبب استفاده از دو روش متفاوت شبیه‌سازی مطرح شده بر روی آن‌ها شد. لذا جهت پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی گوسی متوالی بر روی داده‌های عنصر مس، در ابتدا این داده‌ها به توزیع نرمال



شکل ۵- شبکه نمونه برداری اجرا شده برای خاک در منطقه دالی شمالی

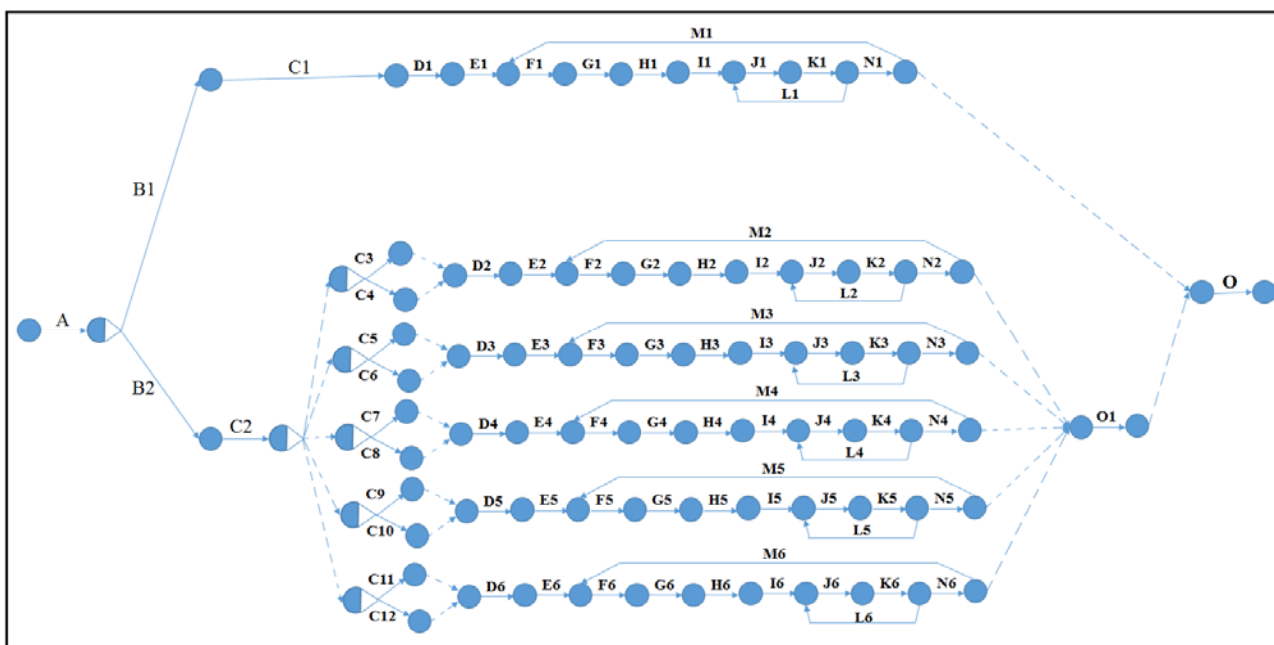
در مرحله بعد جهت تعیین امتداد کانی‌سازی و تعیین پارامترهای بهینه بیضی جستجو برای نقاط جهت انجام کریجینگ، بر روی داده‌های نرمال واریوگرافی انجام شد (D1). جهت ادامه کار، منطقه نمونه‌برداری شده به شبکه‌ای منظم جهت تخمین تبدیل شده (E1) و یک نقطه به تصادف انتخاب و در یک مسیر تصادفی تمام نقاط مورد بررسی قرار خواهند گرفت (F1). در هر یک از نقاط تصادفی انتخابی پس از محاسبه تخمین (G1) و واریانس تخمین (H1) با توجه به مقدار میانگین و واریانس بدست آمده برای هر نقطه (مقدار تخمین و واریانس آن) تابع توزیع تجمعی آن رسم شده (I1) و از این تابع توزیع یک نقطه به تصادف خارج می‌شود (J1). با جمع کردن مقدار تصادفی خارج شده با مقدار تخمینی نقطه اول شبیه‌سازی شده (K1) و با شبیه‌سازی تمام نقاط به ترتیب قرارگیری در مسیر تصادفی یک تحقق ایجاد خواهد شد (N1). دو فعالیت J1 و F1 باعث ایجاد حلقه‌های L1 و M1 در شبکه شده است، که تعداد تکرار آن بستگی به تعداد تحقق مورد انتظار دارد. در ادامه با استفاده از اعتبارسنجی آماری و زمین-آماري تحقق‌های مختلف، شبیه‌سازی مناسب انتخاب می‌شود (O).

همچنین براساس الگوریتم روش شبیه‌سازی شاخص متوالی، در ابتدا چند حدآستانه مناسب جهت تبدیل داده‌ها از

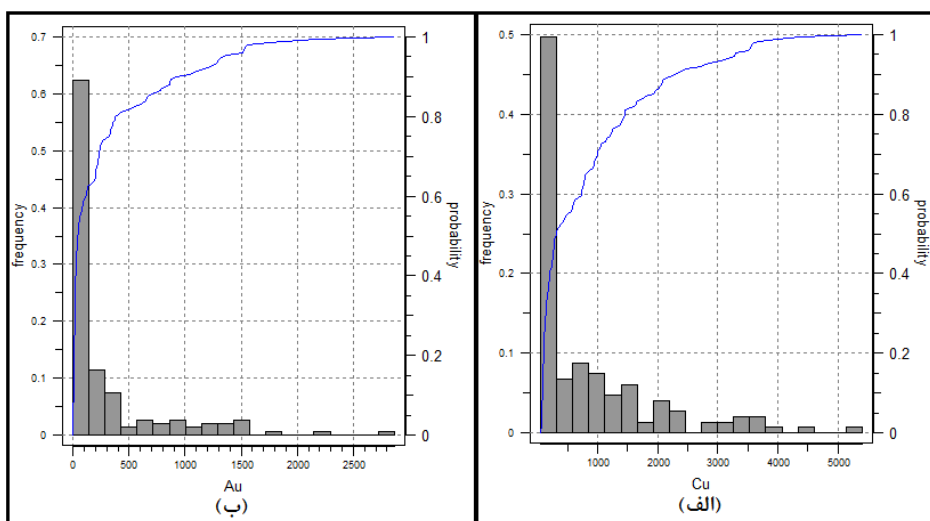
جدول ۱- پارامترهای آماری عنصر مس قبل و بعد از نرمال‌سازی داده‌ها

داده‌های خام		داده‌ها پس از نرمال‌سازی		متغیر مس (ppm)
میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	
۸۶۰/۷۷۲	$1/11 \times 10^6$	۰/۰۰۲۶	۰/۹۴۵	

تبدیل شد (جدول ۱ و شکل ۸). نتایج واریوگرافی بر روی داده‌های نرمال‌شده عنصر مس، نشان دهنده‌ی این است که جهت اصلی و فرعی کانی‌سازی به ترتیب در آزمون ۶۰ و ۱۵۰ درجه می‌باشد (شکل ۹). مطابق با شکل ۹، معادلات واریوگرام عنصر مس در دو جهت به صورت رابطه (۴) است.

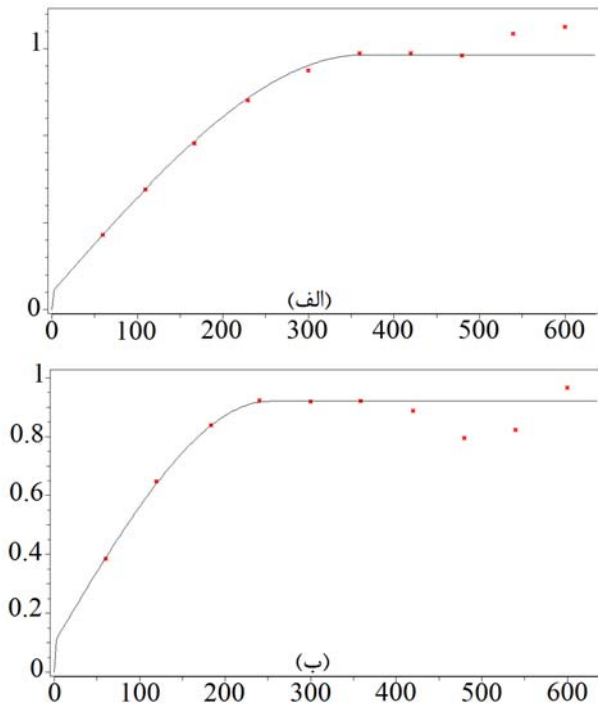


شکل ۶- مدیریت و مراحل ترسیم شبکه گرت برای برنامه‌ریزی شبیه‌سازی عناصر مس- طلا پورفیری دالی شمالی



شکل ۷- هیستوگرام و تابع توزیع تجمعی داده‌های خام عناصر الف- مس ب- طلا





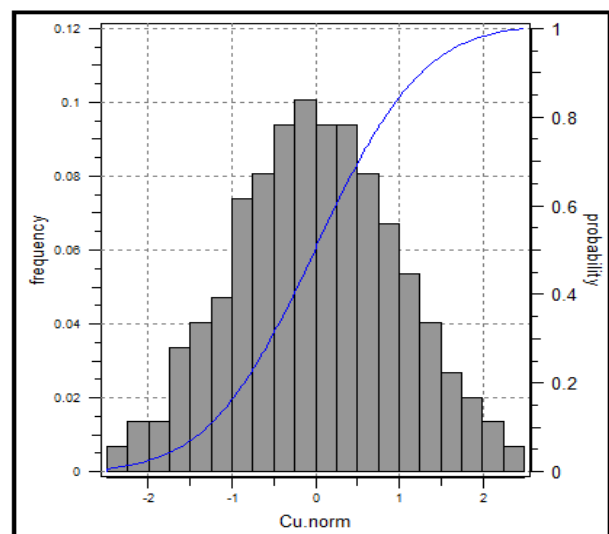
شکل ۹- واریوگرافی عنصر مس در جهات الف- اصلی ۶۰ درجه ب- فرعی ۱۵۰ درجه

جهت شبیه‌سازی شاخص متوالی بر روی عنصر طلا، با توجه به توزیع این عنصر جهت تبدیل داده‌های پیوسته به گسسته پنج حدآستانه ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ ppb انتخاب و داده‌ها با توجه به این حدآستانه‌ها به اعداد یک و صفر تبدیل شدند. مطابق با مطالب بیان شده، بر روی هر یک از این مجموعه داده‌های ایجاد شده جهت تعیین پارامترهای پنجره جستجو، واریوگرافی انجام گرفت (شکل ۱۲ و ۱۳). نتایج حاصل از واریوگرافی نشان دهنده یک روند کانی‌سازی در آزمون ۶۰ درجه همانند عنصر مس در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. مطابق با شکل‌های ۱۲ و ۱۳، معادلات واریوگرام‌های شاخص عنصر طلا در دو جهت به صورت رابطه (۵) است.

پنج معادله اول در رابطه (۵) واریوگرام‌های شاخص کروم هر یک از حدآستانه‌ها در امتداد N60E (جهت اصلی) و پنج معادله بعد در این رابطه واریوگرام‌های شاخص کروم هر یک از حدآستانه‌ها در امتداد N30W (جهت فرعی) را نشان می‌دهند.

$$\begin{cases} \gamma_{major} = 0.1 + 0.88Sph(366) \\ \gamma_{minor} = 0.1 + 0.82Sph(252) \end{cases} \quad (۴)$$

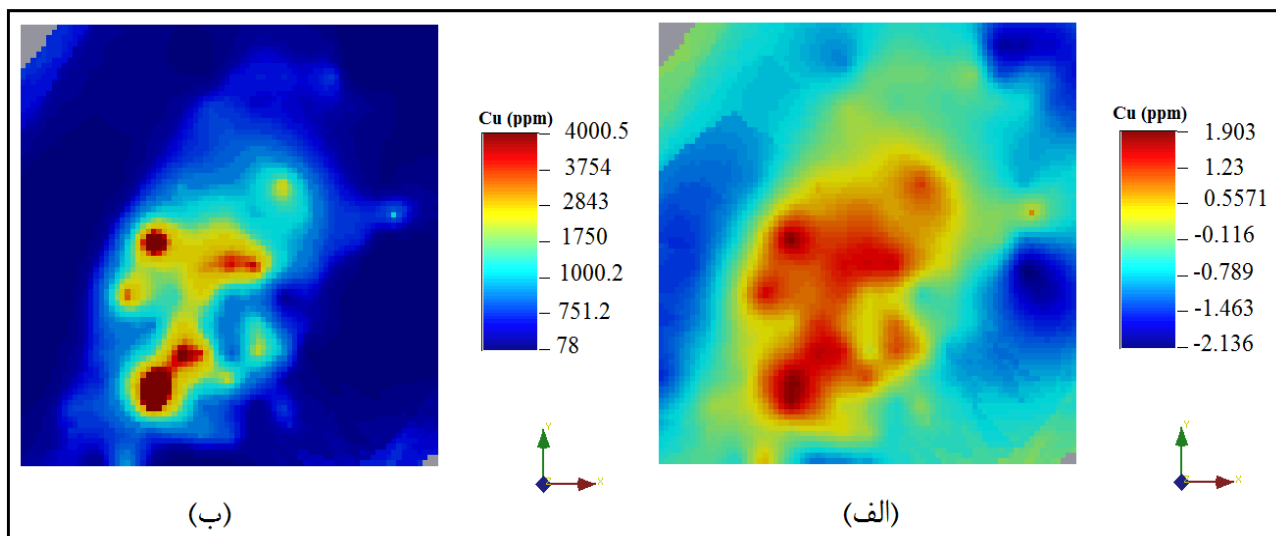
معادلات (۴) نشان دهنده واریوگرام‌های تک ساختاره کروم با رنج‌های ۳۶۶ درجه در آزمون N60E (جهت اصلی) و ۲۵۲ درجه در امتداد N30W (جهت فرعی) می‌باشد.



شکل ۸- هیستوگرام و تابع توزیع تجمعی داده‌های عنصر مس پس از نرمال‌سازی

لذا براساس پارامترهای بهینه به دست آمده برای بیضی جستجو و مطابق آنچه در شبکه برنامه‌ریزی گرت گفته شد، پس از شبکه بندی و انتخاب نقطه و مسیر تصادفی نقاط با استفاده از روش کریجینگ ساده مقدار مس تخمین زده شدند (شکل ۱۰- الف). لازم است پس از هر مرحله داده‌های حاصل دوباره به محیط واقعی و قبل از نرمال‌سازی بازگردانده شوند (شکل ۱۰- ب).

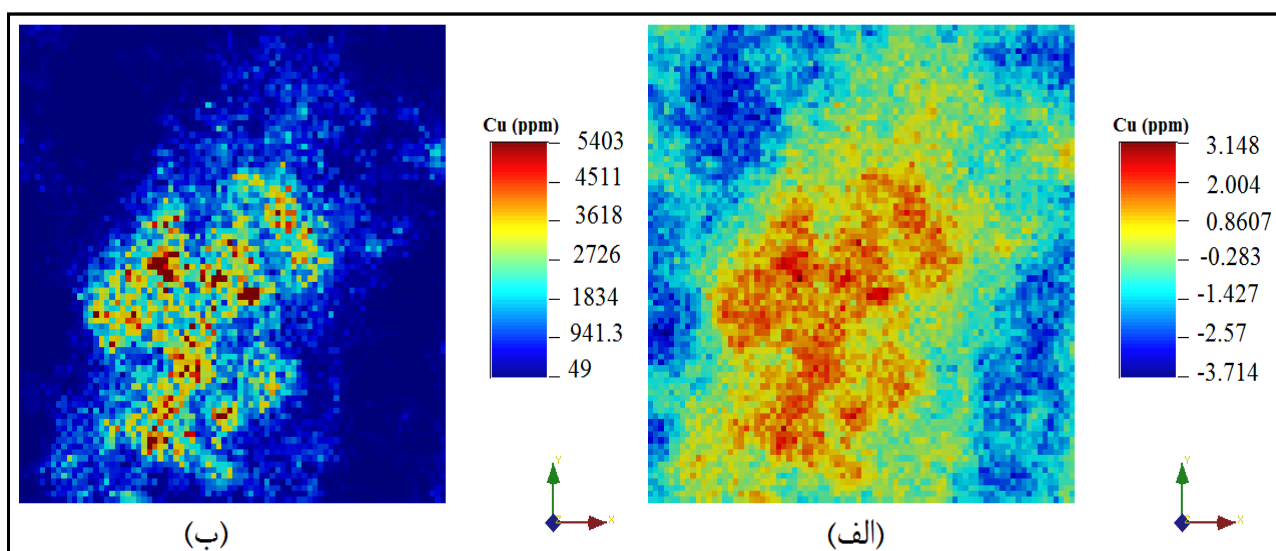
از آنجا که روش کریجینگ در بازتولید داده‌های اولیه ناتوان است، لذا از شبیه‌سازی زمین‌آماري جهت حل این مشکل و نمایش بهتر تغییرات غلظت در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. در این تحقیق در راستای مطالب بیان شده در بخش‌های قبل تعداد ۱۰۰ تحقق برای عنصر مس شبیه‌سازی انجام شد و با استفاده از اعتبارسنجی‌های معتبر (جدول ۲) شبیه‌سازی مناسب‌تر انتخاب گردید (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش کریجینگ ساده عنصر مس الف- در محیط نرمال ب- در محیط واقعی

جدول ۲- مقایسه پارامترهای آماری و زمین‌آماري داده‌های اولیه و شبیه‌سازی انتخاب شده برای عنصر مس

داده‌های اولیه	شبیه‌سازی انتخاب شده	پارامترهای آماری	
۸۶۰/۷۲۲	۸۶۱/۰۰۵	میانگین	پارامترهای آماری
$1/11 \times 10^6$	$1/12 \times 10^6$	واریانس	
۰/۹۸	۰/۹۸۵	سقف واریوگرام	پارامترهای زمین‌آماري
۳۶۶	۳۷۰	رنج واریوگرام	



شکل ۱۱- نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش شبیه‌سازی گوسی متوالی عنصر مس الف- در محیط نرمال ب- در محیط واقعی

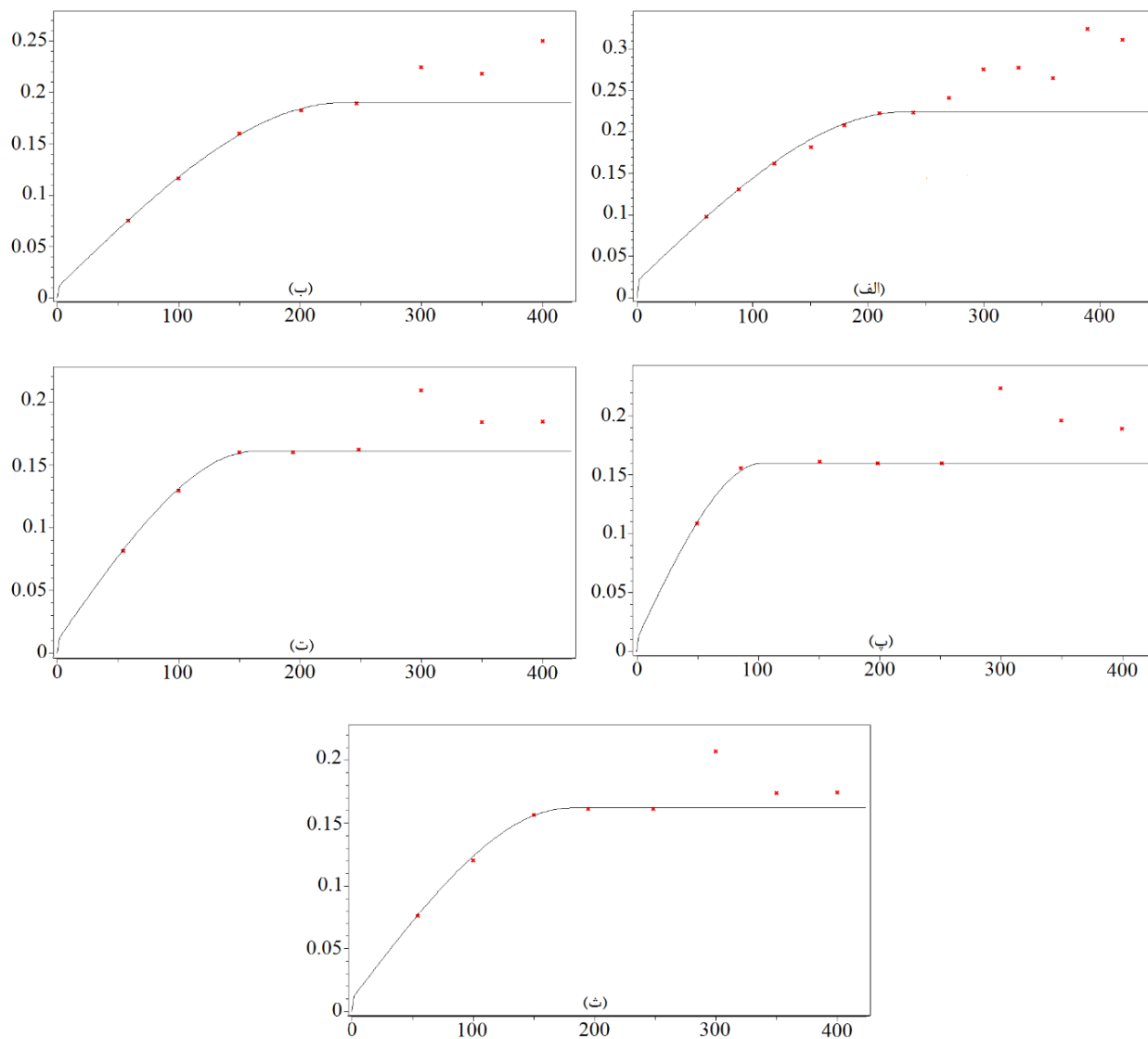
## ۵- نتیجه گیری

در برنامه‌ریزی پروژه‌های اکتشافی با استفاده از روش‌های شبکه‌ای، با توجه به وجود فعالیت‌های احتمالی در این پروژه‌ها استفاده از روش برنامه‌ریزی شبکه‌ای ارزیابی و بازنگری گرافیکی نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد. در مدل‌سازی نهشته‌های کانساری با استفاده از شبیه‌سازی‌های زمین‌آماري توجه به ویژگی داده‌ها و هدف مورد مطالعه، انتخاب این روش -ها بسیار اهمیت دارد. بدین منظور، طراحی یک شبکه برنامه‌ریزی با استفاده از روش گرت می‌تواند یک الگوی مناسب را در اختیار اجرا کننده طرح قرار دهد. در میان الگوریتم‌های مختلف شبیه‌سازی زمین‌آماري استفاده از روش گوسی متوالی و شاخص متوالی زمانی که عناصر کانی سازی با توزیع چولگی متفاوت موجود باشد، اهمیت دارد. در این مطالعه، با توجه به بررسی نهشته مس - طلا پورفیری دالی شمالی، یک شبکه شبیه‌سازی متشکل از روش گوسی متوالی و شاخص متوالی طراحی شد و سپس براساس شروط تعریف شده در این شبکه مدل‌سازی این نهشته کانساری انجام شد. در شبیه‌سازی عناصر با چولگی زیاد استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی که در شبیه‌سازی عناصری مانند مس مناسب است، مناسب نبوده و استفاده از روش شبیه‌سازی شاخص متوالی جهت اینکار پیشنهاد می‌شود. نتایج حاصل نشان دهنده یک نهشته کانساری مس - طلا پورفیری با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی (آزیموت ۶۰ درجه) در قسمت‌های مرکزی منطقه دالی شمالی است. همچنین، استفاده از روش شبکه گرت، زمان محاسبات را کمتر نموده و درانتخاب بهترین روش شبیه‌سازی مناسب با داده مورد بررسی کمک زیادی نموده است. در واقع، برنامه‌ریزی پروژه شبیه‌سازی با توجه به ماهیت داده‌ها و روش‌های شبیه‌سازی باعث می‌شود تا بجای پیاده‌سازی تمام روش‌ها بر روی داده‌ها به منظور انتخاب بهترین روش و صرف زمان زیاد تنها روش مناسب از قبل انتخاب و پس از آن شبیه‌سازی انجام شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{major-Threshold1} = 0.02 + 0.204Sph(231) \\ \gamma_{major-Threshold2} = 0.01 + 0.18Sph(236) \\ \gamma_{major-Threshold3} = 0.01 + 0.15Sph(104) \\ \gamma_{major-Threshold4} = 0.01 + 0.151Sph(164) \\ \gamma_{major-Threshold5} = 0.01 + 0.152Sph(180) \\ \gamma_{minor-Threshold1} = 0.02 + 0.204Sph(132) \\ \gamma_{minor-Threshold2} = 0.01 + 0.18Sph(120) \\ \gamma_{minor-Threshold3} = 0.01 + 0.15Sph(32) \\ \gamma_{minor-Threshold4} = 0.01 + 0.151Sph(100) \\ \gamma_{minor-Threshold5} = 0.01 + 0.152Sph(96) \end{array} \right. \quad (5)$$

مطابق با شکل ۶، پس از شبکه بندی در یک مسیر تصادفی با استفاده از کریجینگ ساده و شبیه‌سازی تغییرات غلظت نهشته در منطقه مدل‌سازی شد (شکل ۱۴). در این روش پس از مراحل تخمین و شبیه‌سازی نیاز است تا داده‌های حاصل به فضای پیوسته برگردانده شود. همانند روش شبیه‌سازی گوسی متوالی در این روش نیز ۱۰۰ بار شبیه‌سازی انجام شد. با توجه به نحوه پیشنهادی، داده‌های گسسته شبیه‌سازی به داده‌های پیوسته تبدیل شده و با استفاده از اعتبارسنجی‌های مناسب، شبیه‌سازی معتبر انتخاب گردید (جدول ۳).

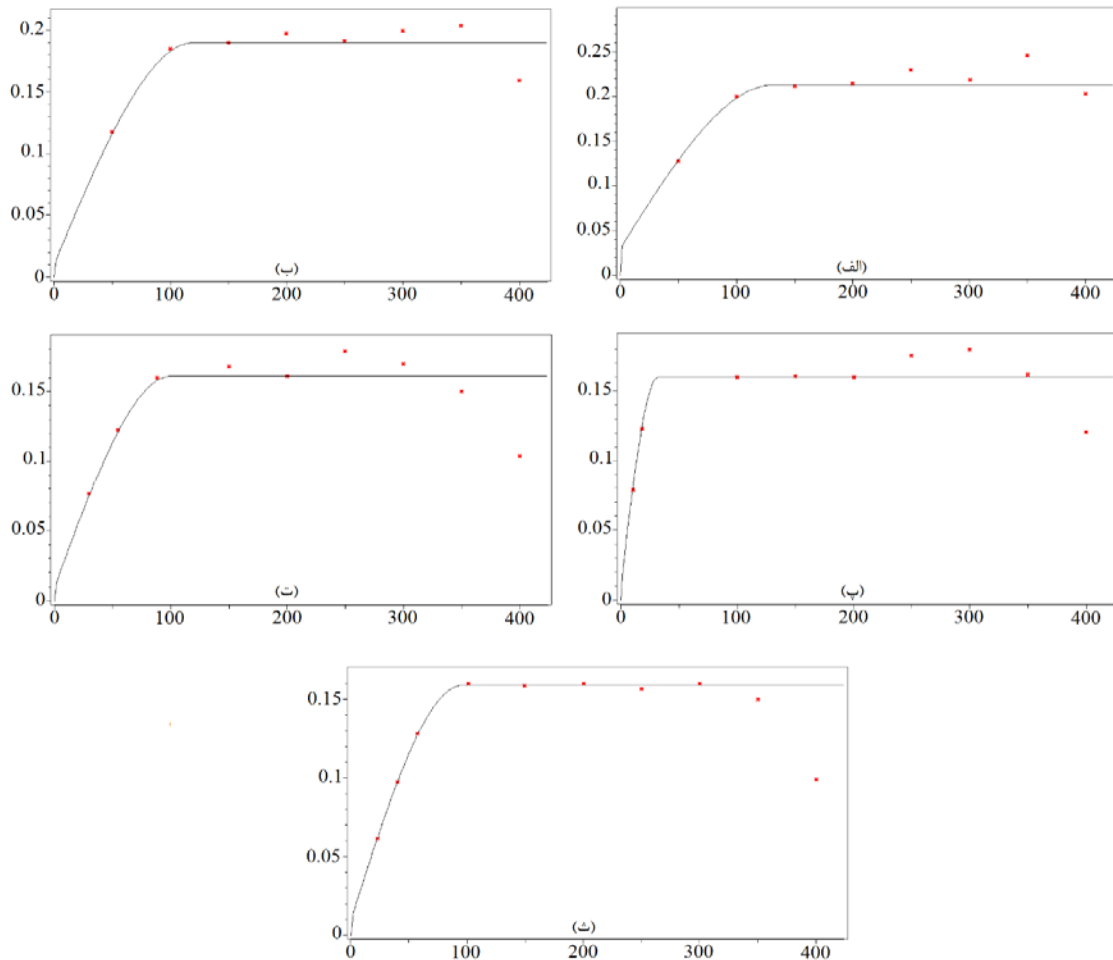
متناسب با آنچه که در شکل‌های ۳ و ۶ بیان شده است، پس از انجام صد بار شبیه‌سازی بر روی هر کدام از حدآستانه‌ها و انتخاب تحقق مناسب، با استفاده از رابطه (۳)، نقشه کریجینگ و شبیه‌سازی عنصر طلا حاصل می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو عنصر مس و طلا نشان دهنده همبستگی بالای این دو عنصر و نشان دهنده کانی سازی مس - طلا پورفیری با امتداد ۶۰ درجه و در نواحی مرکزی منطقه مورد مطالعه است. نقشه‌های زمین‌شناسی و تصویر ماهواره‌ای منطقه دالی شمالی صحت نتایج حاصله را اثبات می‌نماید.



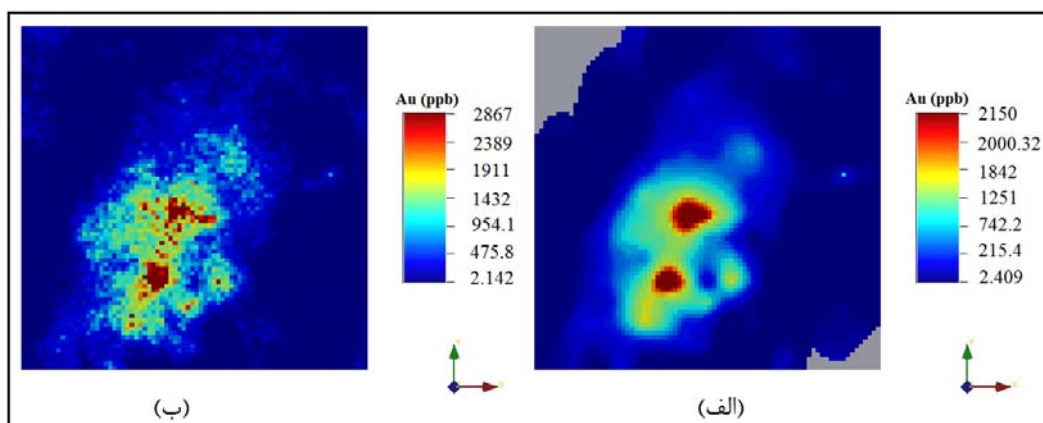
شکل ۱۲- واریوگرافی عنصر طلا در جهت اصلی و روند کانی‌سازی (آزموت ۶۰ درجه) برای حد‌آستانه‌های الف- ۲۰۰- ب- ۳۰۰- پ- ۴۰۰- ت- ۵۰۰- ۶۰۰- (ppb)

جدول ۳- مقایسه پارامترهای آماری و زمین‌آماري داده‌های اولیه و شبیه‌سازی انتخاب شده برای عنصر طلا

داده‌های اولیه	شبیه‌سازی انتخاب شده	پارامترهای آماری	
۲۸۵/۶۷۸	۲۸۴/۵۶۲	میانگین	پارامترهای آماری
۲۳۶۹۳۷	۲۲۹۹۴۷	واریانس	
۰/۲۴۵	۰/۲۴۲	سقف واریوگرام	پارامترهای زمین‌آماري
۲۳۵	۲۴۰	رنج واریوگرام	



شکل ۱۳- واریوگرافی عنصر طلا در جهت فرعی و عمود بر روند کانی‌سازی (آزیموت ۱۵۰ درجه) برای حد‌آستانه‌های الف- ۲۰۰ پ- ۳۰۰ پ- ۴۰۰ ت- ۵۰۰ ت- ۶۰۰ (ppb)



شکل ۱۴- نقشه‌های تغییرات غلظت عنصر طلا در منطقه دالی شمالی با استفاده از الف- کریجینگ ساده شاخص ب- شبیه‌سازی شاخص متوالی

## ۶- منابع

- [10] Lantuéjoul, C., 2013, "Geostatistical simulation: models and algorithms". Springer Science & Business Media.
- [11] طالب حسینی، سجاد؛ قوامی‌ریابی، سیدرضا؛ اصغری، امید؛ ۱۳۹۵؛ "تعیین مناطق آنومال با استفاده از تلفیق نتایج شبیه‌سازی زمین‌آماري و مدل‌سازی نمودار احتمال (مطالعه موردی: باغ‌غلوم کرمان)"، چهارمین کنگره و نمایشگاه بین‌المللی معدن و صنایع معدنی ایران و ششمین کنفرانس مهندسی معدن ایران.
- [12] 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 Baghloom area, Iran". Journal of Mining and Environment 9(1), 153-167.
- [13] 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.
- [14] Dimitrakopoulos, R., Luo, X., 2004, "Generalized sequential Gaussian simulation on group size  $v$  and screen-effect approximations for large field simulations". Mathematical Geology 36(5), 567-591.
- [15] Lin, Y.P., Chang, T.K., Teng, T.P., 2001, "Characterization of soil lead by comparing sequential Gaussian simulation, simulated annealing simulation and kriging methods". Environmental Geology 41(1-2), 189-199.
- [16] Boisvert, J.B., Deutsch, C.V., 2011, "Programs for kriging and sequential Gaussian simulation with locally varying anisotropy using non-Euclidean distances". Computers & Geosciences 37(4), 495-510.
- [17] Nunes, R., Almeida, J.A., 2010, "Parallelization of sequential Gaussian, indicator and direct simulation algorithms". Computers & Geosciences 36(8), 1042-1052.
- [18] Dowd, P.A., Xu, C., Mardia, K.V., Fowell, R.J., 2007, "A comparison of methods for the stochastic simulation of rock fractures". Mathematical Geology 39(7), 697-714.
- [1] حاج شیر محمدی، علی؛ ۱۳۹۰؛ "مدیریت و کنترل پروژه"، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی اصفهان، جلد اول، ویرایش جدید.
- [2] Stevenson, W.J., Hojati, M., 2007, "Operations management", Vol. 8, Boston: McGraw-Hill/Irwin.
- [3] Wu, Y., Pan, X., Kang, R., He, C., Gong, L., 2014, "Multi-parameters uncertainty analysis of logistic support process based on GERT". Journal of Systems Engineering and Electronics 25(6), 1011-1019.
- [4] Chatwal, S., 2014, "Application of project scheduling in a bottling unit startup using pert and CPM techniques". International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences 3(6), 1-9.
- [5] Ramani, T., Kannan, R., 2014, "Scheduling of Industrialized Construction Project using Graphical Evaluation and Review Technique (GERT)". In Second International Conference on Advances in Industrial Engineering Applications.
- [6] Nelson, R.G., Azaron, A., Aref, S., 2016, "The use of a GERT based method to model concurrent product development processes". European Journal of Operational Research 250(2), 566-578.
- [7] Pradeepa Veerakumari, K., Resmi, R., 2016, "Designing optimum plan parameters for continuous sampling plan of type (CSP-2) through GERT analysis". Journal of Statistics and Management Systems 19(2), 303-311.
- [۸] دارابی گلستانی، فرشاد؛ قوامی‌ریابی، سیدرضا؛ هزارخانی، اردشیر؛ خالوکاکی، رضا؛ سکاکی، سیدحمید؛ اسدی-هارونی، هوشنگ؛ ۱۳۹۵؛ "ساختار مدیریت پروژه اکتشافی در تفکیک آنومالی با روش هندسه فضایی در قالب روش GERT- مطالعه موردی نهشته Cu-Au دالی شمالی"، نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره ۱، شماره ۱۱، صفحه ۱ تا ۱۰.
- [9] Journel, A.G., 1974, "Geostatistics for conditional simulation of ore bodies". Economic Geology 69(5), 673-687.

- [19] Sabeti, H., Moradzadeh, A., Doulati Ardejani, F., Soares, A., 2017, "A new stochastic 3D seismic inversion using direct sequential simulation and co-simulation in a genetic algorithm framework". *Journal of Mining and Environment* 8(3), 321-335.
- [20] Hajsadeghi, S., Asghari, O., Mirmohammadi, M., Meshkani, S.A., 2016, "Indirect rock type modeling using geostatistical simulation of independent components in Nohkouhi volcanogenic massive sulfide deposit, Iran". *Journal of Geochemical Exploration*, 168, 137-149.
- [21] Guo, J.F., Qiao, L.H., 2004, "Modeling of product development process with graphical evaluation and review technique". *Computer Integrated Manufacturing Systems-Beijing* 10, 758-763.
- [22] 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.
- [۲۳] اصغری، امید؛ و نصرت، احسان؛ ۱۳۹۱؛ "زمین‌آمار و زمین‌شناسی نفت، انتشارات پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، جلد اول، چاپ اول.
- [۲۴] حسینی پاک علی اصغر؛ شرف‌الدین محمد شریف‌الدین؛ ۱۳۹۰؛ "تحلیل داده‌های اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، جلد اول، چاپ دوم.
- [25] Asadi Haroni H., 2008, "First Stage Drilling Report on Dalli Porphyry Cu-Au Prospect, Central Province of Iran", Technical Report.