

# شبیه سازی کانسار آهن چغارت با استفاده از روش زمین آماری متوالی گوسی و تعیین ریسک همراه با تخمین

امید اصغری<sup>۱</sup>؛ اردشیر هزارخانی<sup>۲</sup>

## چکیده

برجسته ترین ویژگی شبیه سازی زمین آماری ایجاد مجموعه‌ای از تصاویر، شامل محدوده‌ای از حالت‌های ممکن، درصد احتمال رویداد و همچنین تعیین ریسک همراه است. داده‌های لازم برای این تحقیق، از ۱۲۵ گمانه اکتشافی به دست آمده است. برای انجام مطالعات از ۳۳۳۱ داده آنالیز عنصر Fe استفاده شد. مطالعات آماری چولگی بالایی را برای عیار Fe نشان ندادند. مطالعات زمین آماری با ترسیم واریوگرام‌های جهت دار، نشان دادند که کانسار در جهت خاصی ناهمسانگرد نبوده و می‌توان آن را همسانگرد در نظر گرفت. برای انجام شبیه سازی متوالی گوسی، داده‌ها به نرمال استاندارد تبدیل و ۱۰۰ مرتبه شبیه سازی صورت گرفت. اعتبار سنجی نشان داد که هر ۱۰۰ تصویر تولید شده معتبرند. سپس نقشه‌های E-type، احتمال و نمودارهای عیار - تناژ برای کانسار آهن چغارت ترسیم شد و برای ۲۶ افق کانسار با اختلاف ارتفاع ۲/۵ متر، میزان ذخیره متوسط ۱۰۸ میلیون تن با عیار حد ۴۵ درصد و عیار متوسط ۵۶ درصد تخمین زده آنگاه طی نقشه‌های احتمال، احتمال گذر از عیار حد ۴۵ درصد برای تمامی بلوک‌های کانسار در احتمال‌های ۵۰ و ۸۴ درصد محاسبه شد. همچنین نمودارهای عیار - تناژ، ریسک همراه با استخراج این مقدار ماده معدنی را تعیین کرده و نشان داد که تغییرات تناژ ماده معدنی با عیار حد ۴۵ درصد بین ۹۷ تا ۱۱۶ میلیون تن است.

## کلمات کلیدی

کانسار آهن چغارت، زمین آمار، شبیه‌سازی متوالی گوسی، کریجینگ، واریوگرام، تخمین ریسک

## *Choghart ore Deposit Estimation and Risk Estimation by Sequential Gaussian Simulation (SGS) Method*

Omid Asghari<sup>1</sup> and Ardeshir Hezarkhani<sup>2</sup>

### ABSTRACT

The most important properties of Geostatistical Simulation are producing a group of images, which shows a rang of possible events, calculating probable percentage of happening and also determining the risk in each step of process. 137 holes are drilled in this deposit. 3331 data from 125 drilled holes are gathered for grade estimation and reserve evaluation. Statistical studies show that Fe grade is not skewed and obey a natural model.

plotting the empirical variogram in different directions show neither geometric nor regional anisotropy for the deposit. For simulating via SGS method, data are transferred to standard normal and then simulated 100 times (in this way 100 realization were created). All of the realizations were honor to histogram and variogram of samples, so all realizations are valid. E\_Type and probability maps are drawn in 12.5 meters intervals and grade-tonnage curves were drawn for each realization. E\_Type maps evaluate average 108 million tones with 56%Fe content for whole deposit. Grade-tonnage curves were showed the range of tonnage variance. That is between 97 and 116 million tones for whole deposit.

i - دانشجوی دوره دکترای مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

ii - دانشیار دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## KEYWORDS

Geostatistic, Sequential Gaussian Simulation (SGS), Risk Estimation, Choghart Iron Ore, Kriging, Variogram

تخمین داده‌ها بر روی شبکه انداخته شده با استفاده از یکی از روشهای کریجینگ و رسم هیستوگرام با داشتن میانگین و واریانس تخمین در هر نقطه بیرون کشیدن یک عدد به‌طور تصادفی از هیستوگرام رسم شده

شرطی کردن داده‌ها

تکرار مراحل قبل تا اینکه کلیه شبکه دارای عدد شود

برای انجام شبیه سازی دیگر، کلیه مراحل قبل دوباره تکرار می‌گردند.

تبدیل معکوس داده‌ها به حالت قبل

اعتبار سنجی نتایج

شاید بزرگترین مشکل برای استفاده از روش SGS، انتخاب شعاع جستجو باشد. انتخاب شعاع همسایگی کوچک منجر به شرطی سازی ضعیف داده ها می‌شود [5]. الگوریتم شبیه سازی متوالی گوسی در شکل (۱) نمایش داده شده است.

### ۳- مشخصات عمومی کانسار چغارت

#### ۳-۱- موقعیت جغرافیایی

معادن چغارت در ۱۳ کیلومتری شمال شرقی بافق و ۱۲۰ کیلومتری یزد قرار دارد [۲]. مختصات جغرافیائی مرکز آنومالی عبارت است از: طول جغرافیایی  $0^{\circ} 28'$  و  $55^{\circ}$  عرض جغرافیایی  $01^{\circ}$  و  $42'$  و  $31'$  یا  $2508220-N$  و  $354970-E$ .

#### ۳-۲- ژنز کانسار چغارت

منشا کانسار آهن چغارت و سایر کانسارهای آهن اکسیدی در ناحیه بافق همواره مورد بحث زمین شناسان بوده و علت آن کمبود اطلاعات در ارتباط با مطالعات ایزوتوپها، سیالات درگیر و نتایج آنالیزهای قابل اعتماد است. به طور کلی عده‌ای اعتقاد به تشکیل مستقیم توسط ماگما دارند، در حالی که گروه دیگر معتقد به جانشینی متاسوماتیک سنگ میزبان توسط سیال هیدروترمال غنی از آهن هستند [۷].

### ۱- مقدمه

مهمترین خاصیت شبیه سازی زمین آماری، تولید مجموعه‌ای از مدلها (تصاویر) است که دامنه‌ای از حالت‌های ممکن را به همراه درصد احتمال رخداد آنها شامل می‌شوند. این تکنیک می‌تواند تعداد بسیار زیادی از نقشه‌های توزیع عیار در یک منطقه (کانسار) را تولید کند؛ به‌طوری‌که همگی شباهت معینی باهم و با منطقه مورد بررسی داشته باشند. این شباهت معین به زبان آماری و زمین آماری همان هیستوگرام و واریوگرام منطقه می‌باشد [۱].

از آنجا که در اکتشاف معدن نسبت نمونه‌های برداشت شده به محیط مورد مطالعه بسیار کوچک می‌باشد، در اختیار داشتن حالت‌های مختلف از کانسار بجای یک تصویر میانگین (کریجینگ و اکثر روشهای درونیابی) کمک شایانی در مدلسازی کانسار و همچنین در بهینه سازی برنامه ریزی‌های معدنی می‌نماید. شبیه سازی الگوریتم‌های متنوعی دارد که هر کدام در شرایط خاص بهترین جواب را در اختیار می‌گذارند. در اینجا چون هدف پیشگویی تغییرات عیار و تناژ ماده معدنی بوده است، از روش شبیه سازی متوالی گوسی که برای داده‌های پیوسته مناسب می‌باشد، استفاده شده است [۱].

### ۲- شبیه سازی متوالی گوسی (SGS)

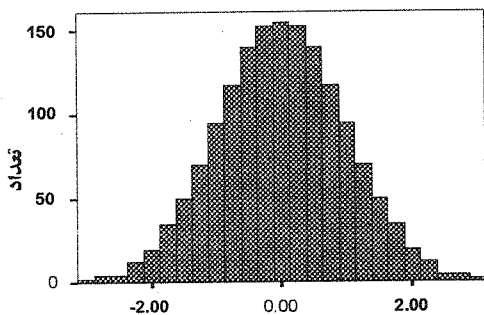
شبیه‌سازی متوالی گوسی یکی از روش‌های معمول و انعطاف‌پذیری است که امروزه در بسیاری از شبیه سازی‌هایی که روی پارامترهایی چون عیار صورت می‌گیرد، فراوان استفاده می‌شود [۲]. در اینجا برای محاسبه ریسک همراه با تخمین ذخیره کانسار از الگوریتم متوالی گوسی (SGS) استفاده شده است. این الگوریتم به داده‌های نرمال استاندارد برای انجام شبیه سازی نیاز دارد. برای هر گره که در آن شبیه سازی صورت می‌گیرد SGS یک هیستوگرام محلی تولید می‌کند که از آن یک مقدار (عدد) بطور تصادفی به‌عنوان مقدار شبیه سازی شده بیرون کشیده می‌شود. مراحل اصلی شبیه سازی متوالی گوسی به قرار زیر است:

رسم هیستوگرام داده‌های اولیه و تبدیل این داده ها به استاندارد نرمال  
رسم واریوگرام با استفاده از داده‌های نرمال استاندارد شده

انتخاب یک مسیر (شبکه) تصادفی برای شبیه سازی



توزیع نرمال استاندارد متغیر ناحیه ای Fe



شکل (۵): هیستوگرام فراوانی داده‌های تبدیل شده به استاندارد نرمال

## ۵- مطالعات زمین آماری

اساس مطالعات زمین آماری، بر وجود ساختار فضایی در داده‌ها بوده و واریوگرام مهمترین ابزار نمایش همبستگی‌های فضایی بین داده‌ها است [۸]. رابطه ۲ مقدار میانگین واریانس عیار بین جفت نقاط را محاسبه می‌کند.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

برای تعیین ساختار فضایی داده‌های Fe در منطقه، واریوگرام غیر جهتی رسم می‌شود. در این مرحله از داده‌های کامپوزیت شده با طول‌های یکسان ۲ متر برای رسم واریوگرام سه بعدی استفاده شد. طول گام بهینه (فاصله بین جفت نقاط) برابر ۴۰ متر در نظر گرفته شد. برای متغیر ناحیه‌ای Fe دو سری واریوگرام غیر جهتی و جهت دار بررسی و ترسیم شد. واریوگرام غیر جهتی با پارامترهای آزمون و شیب برابر صفر درجه و تفرانس برابر ۹۰ درجه مشخص می‌شود در حالیکه واریوگرام جهت‌دار علاوه بر دارا بودن آزمون و شیب مشخص، تفرانس بسیار کمتری دارد [۱۰]. شکل (۶) واریوگرام غیر جهتی داده‌ها را نشان می‌دهد. توجه شود که آستانه یا سقف واریوگرام از واریانس کل جامعه Fe کمتر است. همانطور که مشاهده می‌شود یک مدل کروی با اثر قطعه‌ای  $2(12.2\%)$ ، سقف  $2(28.0\%)$  و دامنه ۲۱۰ متر به این واریوگرام برازش شده است.

ومیزان انحراف آن از توزیع نرمال و امکان تبدیل داده‌ها به توزیع نرمال در فرایند تخمین اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. هرچه تابع توزیع به نرمال نزدیکتر باشد امکان بروز خطای سیستماتیک در فرایند تخمین کاهش می‌یابد. بررسی آماری داده‌ها از این نظر نیز که آیا می‌توان آنها را به عنوان یک جامعه آماری در نظر گرفت یا داده‌ها خصلت چند جامعه‌ای دارند (با چند مد ظاهر می‌شوند) حائز اهمیت است. [۴].

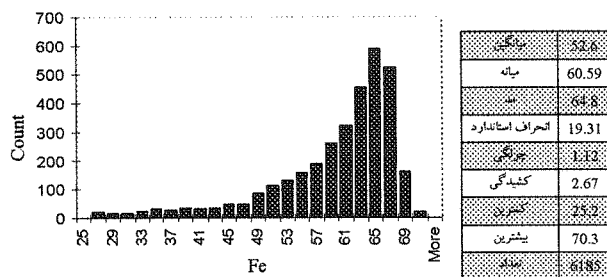
از آنجا که تمامی نمونه‌ها دارای طول‌های یکسانی نبودند، ابتدا هیستوگرامی از تعداد طول نمونه‌های مورد آنالیز ترسیم شد. بر این اساس از مجموع ۳۳۳۱ داده اولیه، تعداد ۱۵۱۷ نمونه (۴۵٪) با طول ۴ متر و پس از آن ۱۱۰۰ نمونه (۳۳٪) با طول ۲ متر دارای بیشترین فراوانی‌ها بودند. برای جلوگیری از میانگین گیری داده‌های حاصل از آنالیز، تصمیم گرفته شد تا کامپوزیت‌هایی با طول ۲ متر تهیه شوند. از این رو با استفاده از رابطه ۱، کلیه نمونه‌ها به کامپوزیت‌های ۲ متری تبدیل شدند. پس از این مرحله، تعداد ۶۱۸۵ داده جدید برای متغیرهای ناحیه‌ای Fe تولید شد.

$$G_C = \frac{\sum_{i=0}^n L \times G_p}{\sum_{i=0}^n L}, \quad \sum L = 2m \quad (1)$$

که در آن L طول نمونه اولیه، Gp عیار نمونه اولیه، n تعداد نمونه‌های اولیه و Gc عیار نمونه کامپوزیت شده است.

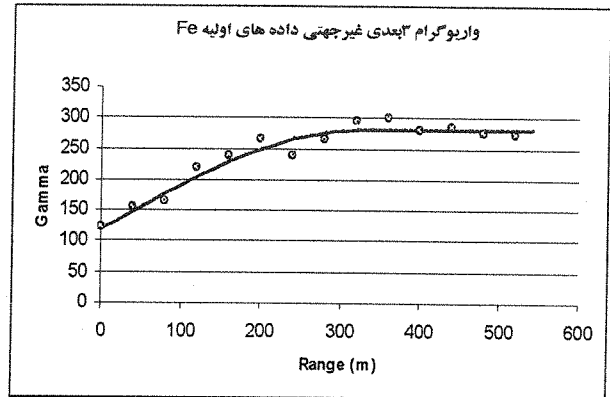
بررسی‌های آماری انجام شده بر این داده‌های کامپوزیت شده نشان می‌دهند که توزیع عیار در این کانسار از چولگی پائینی در حدود ۱/۱۲ برخوردار است. شکل (۲) هیستوگرام این توزیع را به همراه پارامترهای آماری نشان می‌دهد.

تابع توزیع متغیر ناحیه ای Fe



شکل (۴): هیستوگرام و پارامترهای آماری داده‌های خام

برای شبیه سازی داده‌ها به روش گوسی متوالی، لازم است داده‌ها در ابتدا به استاندارد نرمال تبدیل شوند. می‌دانیم تابع استاندارد نرمال دارای واریانس ۱، انحراف استاندارد ۱، چولگی صفر و میانگین صفر است [۵]. شکل (۳) هیستوگرام داده‌های تبدیل شده به استاندارد نرمال را نشان می‌دهد.



شکل (۶): واریوگرام سه بعدی غیرجهتی کانسار

## ۶- تشخیص همسانگردی کانسار

لازم است فضایی به نام فضای تخمین تعریف شود. این محدوده باید فضایی باشد که بخش عمده آن را کانسنگ تشکیل می‌دهد در تعیین چنین مرزهایی مقدار عیار کنترل کننده اصلی است ولی در مواردی که داده‌های عیار سنجی کافی نیست، داده‌های زمین‌شناسی مانند همبری واحدهای سنگی، گسل‌ها و دیگر عوامل ساختمانی می‌توانند در تصحیح و اصلاح مرزها مفید واقع شوند. در این مطالعه در مرحله اول همبری متاسوماتیت و کوارتز پرفیری به عنوان مرز بین کانه‌سازی و باطله تشخیص داده شد زیرا کانی‌سازی در مجموعه متاسوماتیت‌ها انجام گرفته است. براساس نقشه‌های تهیه شده، مرز بین باطله و کانه در هر افق (فاصله بین هر افق ۱۲/۵ متر) در محیط اتوکد تبدیل به یک حجم سه بعدی شد و در مرحله آخر، براساس داده‌های گمانه‌ها اصلاح نهایی شد؛ به این صورت که براساس عیار گمانه‌ها بخش‌هایی از فضای تخمین حذف و بخش‌هایی دیگر اضافه شد [۳]. برای شبیه سازی از بلوک‌هایی به ابعاد ۲۵×۲۵×۱۲/۵ متر استفاده شد که در آن ارتفاع بلوک تخمینی برابر با ارتفاع بلوکهای استخراجی و معادل ۱۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. در نهایت کل کانسار آهن چغارت مشتمل بر ۶۶۹۳ سلول با ابعاد فوق تقسیم‌بندی شد.

## ۷-۲- شبیه سازی

برای بدست آوردن ۱۰۰ تصویر، ۱۰۰ بار شبیه سازی بر روی کلیه بلوکها (سلولها) صورت گرفته است. برای تخمین بلوکها از روش کریجینگ استفاده شد و در آن به جای استفاده از بیضوی آنیزوتروپی، از کره ای با شعاع تاثیر ۲۰۸ متر استفاده شد [۲]. کریجینگ یک روش تخمین زمین آماری است. به طور خلاصه می‌توان آن را بهترین تخمین گر خطی نااریب دانست. این تخمین گر خطی ضمن آن که کمترین واریانس تخمین را تنظیم می‌کند، نا اریب بودن تخمین‌ها را نیز تضمین می‌کند [۸]. یکی از قابلیت‌های کریجینگ آن است که قادر است هم به صورت نقطه‌ای و هم بلوکی تخمین بزند. شکل (۶) افق ۱۱۵۰ متری این کانسار را پس از شبیه سازی در چهار تصویر ۳۲، ۴۶، ۶۲ و ۸۷ نشان می‌دهد.

برای تشخیص همسانگردی یا ناهمسانگردی عیار آهن در کانسار چغارت، واریوگرام‌های جهت دار در آزمایش‌های ۰،۴۵،۹۰،۱۲۵ با شیب‌های ۰،۴۵،۹۰،۱۲۵ و تیلانس ۲۲،۵ درجه ترسیم شدند. جدول (۱) پارامترهای زمین آماری مدل‌های برازش شده به واریوگرام‌های ترسیم شده را نشان می‌دهد. با توجه به واریوگرافی‌های صورت گرفته در اکثر واریوگرام‌ها شعاع تاثیرها تقریباً یکسان (۲۷۰-۳۱۵ متر) و آستانه‌ها مشابه (۳۰۰-۳۲۰) بدست آمد. بر همین اساس به منظور تخمین هر بلوک و شبیه سازی آن، به جای استفاده از بیضوی آنیزوتروپی، از کره ای با شعاع تاثیر برابر با دو سوم دامنه واریوگرام غیر جهتی استفاده شد.

جدول (۱): پارامترهای زمین آماری مدل‌های برازش شده به

واریوگرام‌های جهت دار و غیر جهتی

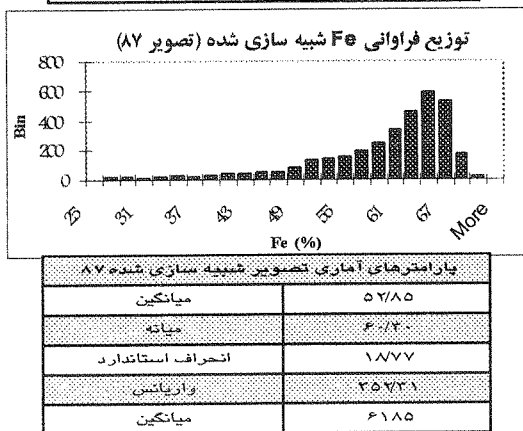
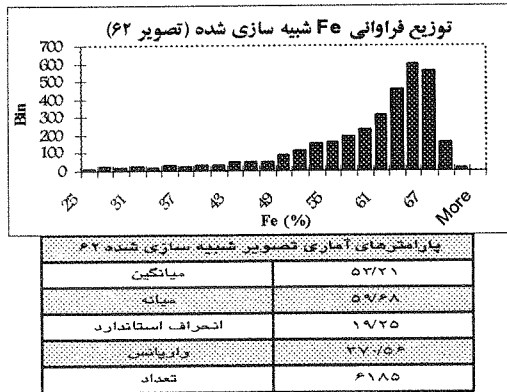
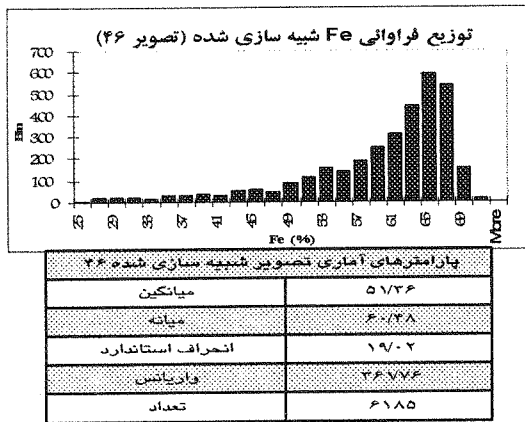
مدل واریوگرام	ازیموت شیب	تیلانس	سقف اثر قطعه ای (%)	دامنه (متر)
۱- کروی	۰	۲۲/۵	۲۱۵	۲۰۸
۲- کروی	۴۵	۲۲/۵	۲۸۵	۲۱۲
۳- کروی	۹۰	۲۲/۵	۲۷۰	۲۲۰
۴- کروی	۱۲۵	۲۲/۵	۳۰۸	۲۰۵
۵- کروی غیر جهتی	غیر جهتی	۲۲/۵	۲۸۰	۲۱۰

## ۷- شبیه سازی کانسار

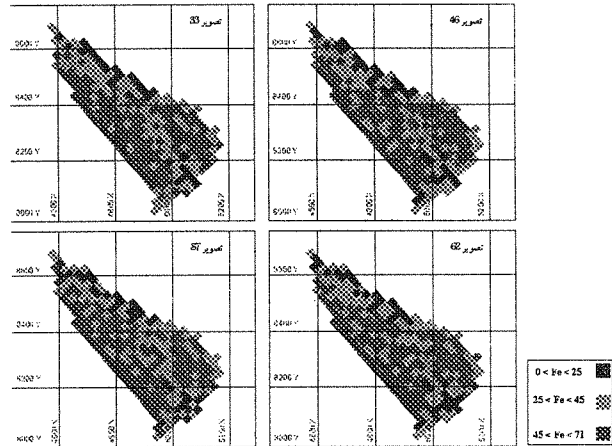
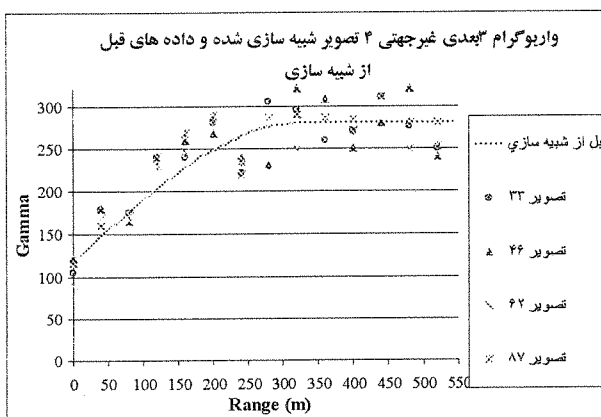
برای کلیه محاسبات تخمین و شبیه سازی متوالی گوسی از نرم افزار GSLIB استفاده شد. این نرم افزار، مجموعه‌ای از نرم افزارهای زمین آماری است که در دانشگاه استنفورد برنامه نویسی شده است [۶].

## ۷-۱- تعیین فضای تخمین

در اولین گام، به منظور کنترل فرایند تخمین و شبیه سازی



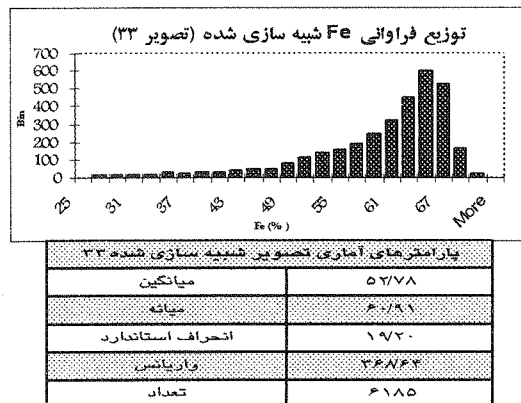
شکل (۸): هیستوگرام فراوانی و پارامترهای آماری ۴ تصویر ۳۳، ۴۶، ۶۲ و ۸۷ پس از شبیه سازی متوالی گوسی



شکل (۷): نتایج شبیه سازی افق ۱۵۰ متری در ۴ تصویر

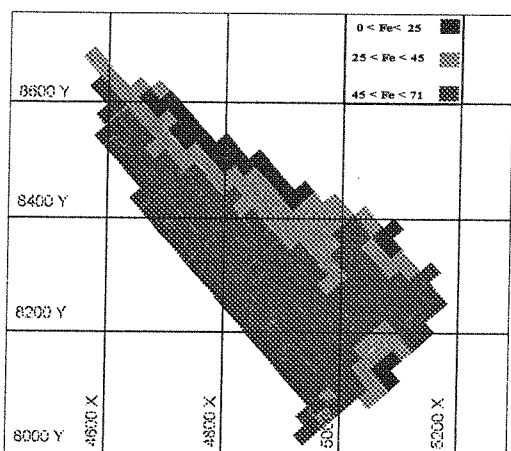
## ۸- اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی (تصویرها) هنگامی قابل قبول هستند که بتوانند هیستوگرام و واریوگرام جامعه را دوباره تولید کنند [۱]. از این رو، هیستوگرامها و واریوگرامهای ۱۰۰ تصویر شبیه سازی شده محاسبه شدند. شکل (۷) هیستوگرامهای ۴ تصویر ۳۳، ۴۶، ۶۲ و ۸۷ را نشان می‌دهد. جدول (۲) پارامترهای آماری این ۴ تصویر را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، تصویرها قادر به بازسازی هیستوگرام کانسار بوده‌اند. چراکه کلیه پارامترهای آماری جامعه، قبل از شبیه سازی بسیار نزدیک به پس از شبیه سازی است. مقایسه واریوگرامهای تصویرها با مدل برازش شده به داده‌های اولیه نیز در شکل (۹) بیان کننده این است که تصویرها بخوبی قادر به تولید مجدد پارامترهای زمین آماری منطقه بوده‌اند و از این لحاظ نیز دارای اعتبار مناسب هستند. بنابراین، از آنجا که تمامی تصویرها قادر به تولید مجدد پارامترهای آماری و زمین آماری منطقه بوده‌اند، لذا تمامی آنها معتبرند و می‌توان از آنها در تحلیل‌های بعدی استفاده کرد.

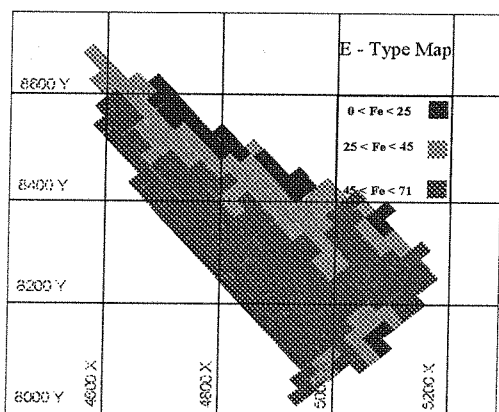


## ۹- نقشه E-type

پس از اینکه تصویرها بدست آمدند و نتایج آنها اعتبار سنجی شدند، نقشه E-type رسم می‌شود. این نقشه مقدار متوسط نهایی تخمینی را برای هر بلوک با میانگین گیری بین مقادیر حاصل از ۱۰۰ تصویر نشان می‌دهد. اساس این نقشه آن است که برای هر بلوک از ۱۰۰ مقدار شبیه سازی شده خاص آن بلوک میانگین حسابی گرفته می‌شود. بدین ترتیب یک نقشه میانگین از کل منطقه حاصل می‌شود. از آنجا که این نقشه با میانگین گیری بین ۱۰۰ تصویر حاصل شده است، به نقشه شکل (۹) نقشه E-type افق ۱۱۵۰ کانسار آهن چغارت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل پیداست، مناطق کم عیار و پرعیار ساختاری پیوسته را نشان می‌دهند. با رسم نقشه های E-type برای تمام افقهای کانسار ذخیره‌ای معادل ۱۰۸ میلیون تن با عیار حد ۴۵ درصد و میانگین ۵۶٪ برای این کانسار تخمین زده شد.



شکل (۱۰): نقشه حاصل از کریجینگ در افق ۱۱۵۰ متر

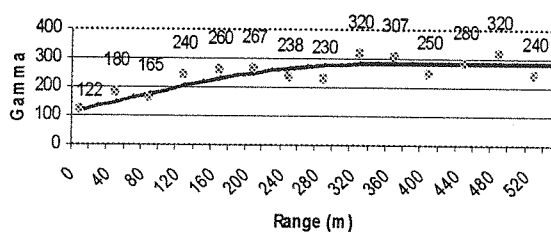


شکل (۱۱): نقشه E-type در افق ۱۱۵۰ متر

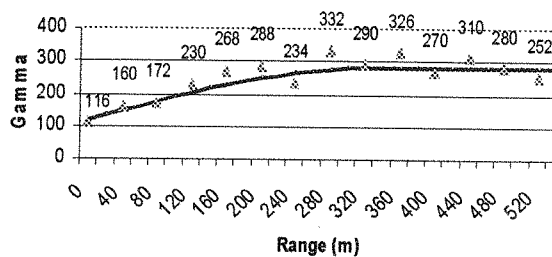
## ۱- نقشه‌های احتمال

از جمله مهمترین نتایجی که از تصویرها حاصل می‌شوند،

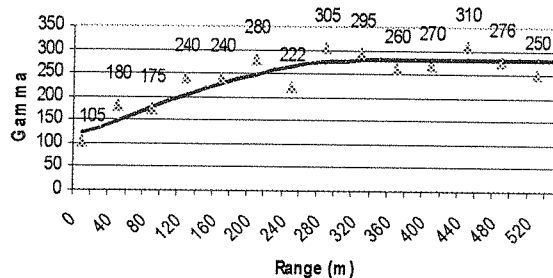
واریوگرام ابعادی غیرجهتی تصویر شبیه سازی شده ۳۳



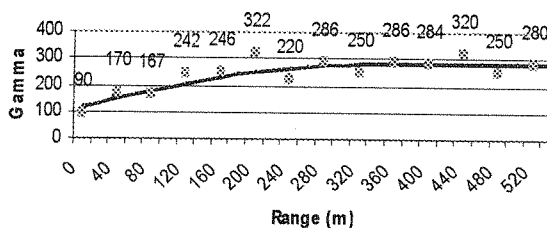
واریوگرام ابعادی غیرجهتی تصویر شبیه سازی شده ۴۶



واریوگرام ابعادی غیرجهتی تصویر شبیه سازی شده ۶۲

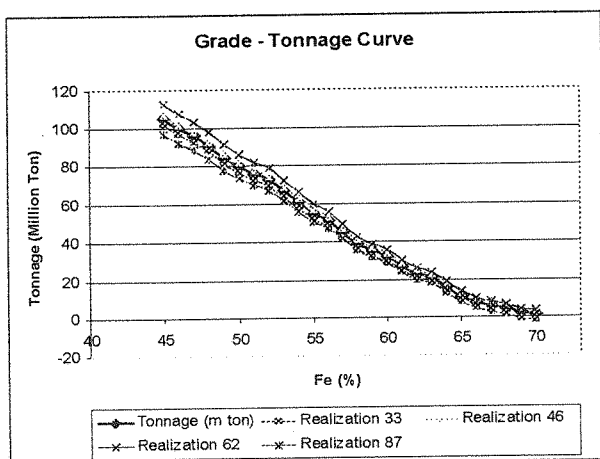


واریوگرام ابعادی غیرجهتی تصویر شبیه سازی شده ۸۷



شکل (۹): واریوگرام‌های تولید شده توسط ۴ تصویر به همراه مدل برازش شده به داده‌های اولیه (خط ممند) - در تصویر اول نقاط واریوگرام‌های چهار تصویر با قرار گرفتن بر روی نمودار واریوگرام قبل از شبیه سازی، انطباق ساختاری فضای شبیه سازی شده جدید را با فضای قبل از شبیه سازی نشان می‌دهند.

نمودار به وقوع بپیوندد، معدن از نظر برنامه‌های استخراجی، فرآوری و حتی از نظر اقتصادی با مشکل مواجه نشود [۱۲].  
رسم منحنی‌های عیار- تناژ به محاسبه تناژ برای عیارهای مختلف نیاز دارد. برای محاسبه تناژ به عیار هر بلوک، جرم مخصوص ماده معدنی و در صد بازیابی مغزه‌ها نیاز است. لذا با توجه به این داده‌ها می‌توان به محاسبه مقدار ذخیره به ازاء عیارهای حد مختلف پرداخت. شکل (۱۳) منحنی عیار- تناژ را برای کانسار چغارت نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که این منحنی‌ها و اساساً تمام محاسبات آورده شده در این مقاله براساس کانسار موجود در معدن در سال ۱۳۸۲ تهیه شده است.



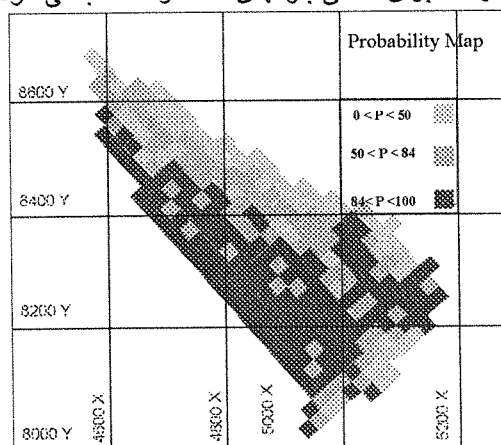
شکل (۱۳): منحنی عیار- تناژ کانسار (خط منقطع نشان دهنده منحنی عیار متوسط- عیار حد و خطوط پیوسته نشان دهنده منحنی‌های عیار حد- تناژ برای تصویرهای مختلف است)

فاصله بین منحنی‌های عیار حد - تناژ در این نمودار نشان می‌دهد که در عیار حد‌های پایین‌تر ریسک تخمین تناژ بالاتر از ریسک تخمین مقدار ماده معدنی در عیار های بالاتر است [۱۲].  
که این از فراوانی داده در عیارهای بالاتر ناشی می‌شود.

## ۱۲- نتیجه گیری

شبیه سازی زمین آماری یکی از کارآمدترین روش‌ها در تعیین ریسک همراه با تخمین ذخیره است. این روش قادر به پیشگویی بهترین و بدترین حالت رخداد ممکن در رابطه با عیار و تناژ ماده معدنی است و بدین ترتیب می‌تواند مهندسان معدن را در جهت برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر استخراجی و فرآوری راهنمایی کند. در کانسار آهن چغارت نیز با استفاده از روش شبیه‌سازی متوالی گوسی، که خود نوعی شبیه سازی زمین آماری است، ذخیره متوسط ۱۰۸ میلیون تن سنگ آهن با عیار متوسط ۵۶٪ Fe بدست آمده است. همچنین نمودارهای احتمال رسم شده احتمال عبور از عیار حد ۴۵ در صد را برای هر

نقشه‌های احتمال است. این نقشه‌ها احتمال عبور از حد معینی از عیار را برای هر بلوک نشان می‌دهند و با شمارش تعداد دفعاتی که عیار یک بلوک از مقدار حدی در تمامی تصویرهای ایجاد شده عبور کند، به دست می‌آیند. در واقع نقشه‌های احتمال امکان برنامه ریزی‌های دقیق استخراجی را برای مهندسان معدن فراهم می‌کنند، چراکه قادر هستند احتمال تحقق عیار برای یک بلوک خاص را با اعداد بین صفر تا ۱۰۰ برحسب درصد بیان دارند. همچنین امکان تعیین نقاط بهینه جهت اکتشافات تفصیلی تر را نیز در اختیار می‌گذارند [۱۱]. شکل (۱۲) نقشه احتمال عبور از حد ۴۵ درصد عیار را در یکی از افق‌ها نشان می‌دهد (یادآور می‌شود در کانسار آهن چغارت، کانسنگ با عیار زیر ۴۵٪ بعنوان کانسنگ کم عیار و در بعضی موارد باطله تلقی می‌شود). این نقشه بر اساس احتمال گذر از مقادیر ۵۰٪ و ۸۴٪ درصد تهیه شده است. بدین ترتیب احتمال گذر از عیار حد ۴۵ درصد برای تمامی بلوکهای کانسار محاسبه می‌شود.



شکل (۱۲): نقشه احتمال گذر عیار از حد ۴۵٪ در افق ۱۱۵۰ کانسار

## ۱۱- منحنی‌های عیار - تناژ

منحنی‌های عیار- تناژ یکی از ابزارهایی هستند که مدیران معدن را قادر به تعیین صحیح پارامترهای برنامه ریزی‌های بلند مدت، میان مدت و کوتاه مدت برای تولید ماده معدنی می‌کنند [۱۰].

این منحنی‌ها امکان تعیین عیار حد بهینه و به دنبال آن مقدار ذخیره را با توجه به عیار متوسط مورد نیاز کارخانه فرآوری فراهم می‌کنند. از آنجا که در شبیه سازی، تصویرهای متعددی از کانسار ایجاد می‌شود، می‌توان بر اساس هر تصویر به یک منحنی عیار- تناژ دست یافت و در نهایت با انطباق تمامی منحنی‌ها بروی یک نمودار به ریسک موجود در تعیین تناژ ذخیره بر اساس عیار حد تعیین شده پی‌برد. تعیین ریسک همراه با تخمین تناژ امکان برنامه ریزی‌های دقیق را برای مهندسان معدن فراهم می‌کند، بطوریکه، اگر حالات بحرانی



داد که تغییرات تناژ ماده معدنی با عیار حد ۴۵ درصد بین ۹۷ تا ۱۱۶ میلیون تن است.

بلوک در اختیار مهندسان استخراج معدن قرار می‌دهند و بدین ترتیب می‌توانند در بهینه سازی برنامه‌ریزی‌های استخراجی کوتاه مدت موثر باشند. همچنین نمودارهای عیار-تناژ، ریسک همراه با استخراج این مقدار ماده معدنی را تعیین کرد و نشان

### ۱۳- مراجع

- [۷] Moor, F., Modabberi S., 2003. Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq mining district, Central Iran: new isotopic and geochemical evidence, Journal of science, Islamic Republic of Iran 14(3), 259-269.
- [۸] Michel, D., 1982, Geostatistical Ore Reserve Estimation, Elsevier Scientific Publishing Co.
- [۹] Webster, R., Oliver, M., 2000. Geostatistic for Environmental Scientists, John Wiley & sons, New York, 270pp
- [10] Vann, J. and Bertoli O. and Jackson, S. (2002). "Geostatistical Simulation for Quantifying Risk", Geostatistical Association of Australian symposium
- [۱۱] Dimitrakopoulos R., Fonseca M. B., (2003), "Assessing Risk in Grade- Tonnage Curves in a Complex Copper Deposit, Northern Brazil, Based on an Efficient Joint Simulation of Multiple Correlated Variables", APCOM, pp 373-382.
- [۱۲] Costa J.F. and Zingano J.A. and Koppe, J.C. (2000), "Simulation -An Approach to Risk Analysis in Coal Mining", Exploration and Mining Geology Vol .9 No.1 pp 43-49.
- [۱] سعید، ساناز؛ "تخمین ذخیره و تعیین ریسک همراه با تخمین بروش شبیه سازی زمین آماری متوالی گوسی؛ مجموعه مقالات کنفرانس مهندسی معدن ۸۳؛ جلد اول؛ ص ۱۴۱ تا ۱۵۴؛ ۱۳۸۳؛
- [۲] اصغری، امید؛ مدلسازی زمین آماری و تخمین ذخیره کانسار آهن چغارت؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ۱۳۸۲
- [۳] حسینی پاک، علی اصغر؛ شرف الدین، محمد؛ "تحلیل داده های اکتشافی؛ انتشارات دانشگاه تهران؛ ویرایش اول؛ ۱۳۸۰
- [۴] مدنی، حسن؛ "مقدمه ای بر زمین آمار؛ انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ویرایش اول؛ ۱۳۷۴
- [۵] رحیم، علیرضا؛ شبیه سازی زمین آماری و کاربرد آن در ارزیابی مخازن نفت؛ سمینار کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ ۱۳۸۳؛
- [۶] Deutsch, C. V., Journel, A.G., 1992, GSLIB: Geostatistical Software Library and user's guide: Oxford Univ. Press, New York, 340 P.

