تخمین ذخیره و تعیین ریسک همراه با تخمین بروش شبیه سازی زمین آماری متوالی گوسی

ساناز سعید*

کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن ، موسسه تحقیقات وکاربرد مواد معدنی ایران

E-mail:sanaz.saeed@gmail.com

چکیده

روش شبیه سازی زمین آماری(Geostatistical Simulation) در سال ۱۹۷۰ توسط ژورنل (A. Journel) مطرح گردید و از آن پس در صنایع مختلفی چون معدن ، محیط زیست ، نفت و گاز بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. مهمترین خاصیت شبیه سازی زمین آماری تولید مجموعه‌ای از مدلها (تصاویر) که دامنه‌ای از حالتهای ممکن را شامل می‌شوند ، به همراه در صد احتمال رخداد آنها و همچنین تعیین ریسک همراه با هر مرحله از عملیات می‌باشد.

داده‌های لازم برای استفاده در این پروژه ، از داده‌های ۵۶ گمانه که در سالهای متفاوت در کانسار حفاری شده‌اند، به‌دست آمده است . جهت انجام مطالعات از ۲۷۳۸ داده که نتایج آنالیزها در گمانه ها می‌باشند ، استفاده شد. مطالعات آماری انجام شده ، چولگی بالایی را برای عیار نشان دادند. بطوریکه توزیع عیار در کانسار بسیار شبیه توزیع L می‌باشد. جهت شناسایی آنیزوتروپی منطقه مطالعات زمین آماری با رسم واریوگرام‌های جهتی بروی داده ها صورت گرفت . این مطالعات نشان دادند که کانسار در جهت $N135E > 45°$ کمترین تغییر پذیری و در جهت $N45E > 0°$ بیشترین تغییرپذیری را دارد.

برای انجام شبیه سازی متوالی گوسی(Sequential Gaussian Simulation ,SGS) ، داده ها به استاندارد نرمال تبدیل شده و سپس ۱۰۰ بار شبیه سازی شدند(بدین ترتیب ۱۰۰ تحقق (Realization)حاصل شد). اعتبار سنجی صورت گرفته بروی نتایج شبیه سازی نشان داد که هر ۱۰۰ تحقق معتبر می‌باشند.

سپس نقشه‌های E-type و احتمال و نمودارهای عیار – تناژ برای این کانسار رسم شد. با رسم نقشه های E-type برای تمام ترازهای کانسار، ذخیره متوسط ۱۰/۷ میلیون تن با عیار حد ۲ درصد برای این کانسار تخمین زده شد. سپس نقشه‌های احتمال، احتمال گذر از عیار حد ۲ درصد را برای تمامی بلوک های کانسار در احتمال های ۵۰ و۸۴ درصد محاسبه کردند. همچنین نمودارهای عیار – تناژ ریسک همراه با استخراج این مقدار ماده معدنی را تعیین کرده و نشان دادند که تغییرات تناژ ماده معدنی با عیار حد ۲ درصد از ۱۰/۳۷ تا ۱۲/۰۶ میلیون تن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی : شبیه سازی زمین آماری، شبیه‌سازی متوالی گوسی (SGS) ، تخمین ذخیره ،ریسک

* تهران- خیابان ولی عصر- زعفرانیه- خیابان پسیان- شارستان ۵(شهید اسمائیلی)-پلاک۹ – ۴ غربی . صندوق پستی : ۸۵۹۱۹-۱۹۸۶۸

مقدمه

مهمترین خاصیت شبیه سازی زمین آماری تولید مجموعه‌ای از مدلها (تصاویر) که دامنه‌ای از حالتهای ممکن را شامل می‌شوند ، به همراه در صد احتمال رخداد آنها می‌باشد. این تکنیک می‌تواند تعداد بسیار زیادی از نقشه‌های توزیع عیار در یک منطقه (کانسار) را تولید کند بطوریکه 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.

از آنجا که در صنعت معدن نسبت نمونه‌های برداشت شده به محیط مورد مطالعه بسیار کوچک می‌باشد لذا در اختیار داشتن حالت‌های مختلف از کانسار به‌جای یک تصویر میانگین (خروجی کریجینگ و اکثر روشهای اینترپولاسیون) کمک شایانی در مدلسازی کانسار و همچنین در بهینه سازی برنامه ریزی‌های معدنی می‌نماید.

از طرف دیگر سرمایه گذاری‌های کلان در بخش معدن احتیاج به تعریف ، فهم و برآورد کلی از ریسک(خطرپذیری) موجود در هر قسمت از فعالیت دارند ، شبیه سازی زمین آماری با محاسبه ریسک و عدم قطعیت همراه با اندازه گیری‌ها، امکان بررسی‌های دقیق اقتصادی و در نتیجه سرمایه گذاری‌ها و برنامه ریزی‌های دقیق تر را فراهم می‌کند.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 لذا از روش SGS که برای داده‌های پیوسته مناسب می باشد، استفاده شده است.

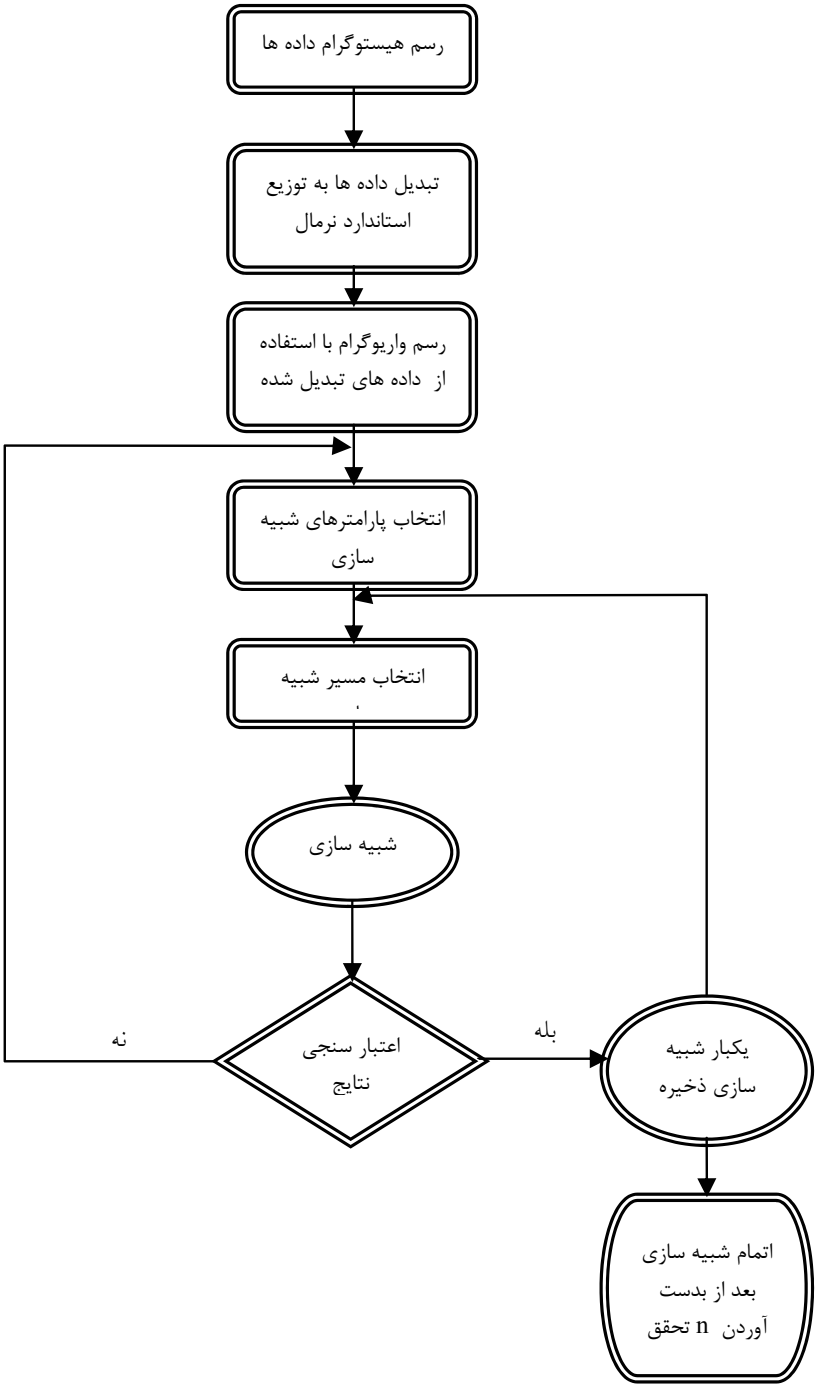
شبیه سازی متوالی گوسی (SGS)

SGS به‌عنوان یکی از روشهای معمول و انعطاف پذیری می‌باشد که امروزه در بسیاری از شبیه سازیهایی که بر روی پارامترهایی چون عیار، تخلخل، تراوایی و ... صورت می گیرد، فراوان استفاده می‌شود [۱و۲]. دراینجا برای محاسبه ریسک همراه با تخمین ذخیره کانسار از الگوریتم متوالی گوسی (SGS)استفاده شده است .این الگوریتم نیاز به داده های استاندارد نرمال جهت انجام شبیه سازی دارد. برای هر گره که در آن عمل شبیه سازی صورت می‌گیرد SGS یک هیستوگرام محلی تولید می‌کند که از آن یک مقدار (عدد) بطور تصادفی بعنوان مقدار شبیه سازی شده بیرون کشیده می شود.مراحل اصلی شبیه سازی متوالی گوسی به قرار زیر می‌باشد:

۱. رسم هیستوگرام داده‌های اولیه و تبدیل این داده ها به استاندارد نرمال $(N(0,1))$
۲. رسم واریوگرام با استفاده از داده‌های نرمال استاندارد شده
۳. انتخاب یک مسیر(شبکه) تصادفی برای شبیه سازی
۴. تخمین داده ها بر روی شبکه انداخته شده با استفاده از یکی از روشهای کریجینگ و رسم هیستوگرام با داشتن میانگین و واریانس تخمین در هر نقطه

۵. بیرون کشیدن یک عدد بطور تصادفی از هیستوگرام رسم شده
۶. شرطی کردن داده ها
۷. تکرار مراحل قبل تا اینکه کلیه شبکه دارای عدد شود
۸. برای انجام شبیه سازی دیگر ،کلیه مراحل قبل دوباره تکرار می‌گردند.
۹. تبدیل معکوس داده ها به حالت قبل
۱۰. 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 [۲]. اما در عین حال باید به این مهم توجه داشت که این روش پرکاربردترین روش شبیه سازی عیار و آلودگی‌های خاک می‌باشد و همچنین بطور وسیعی در بخش نفت مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی ارایه داده است. الگوریتم شبیه سازی متوالی گوسی در شکل۱نمایش داده شده است . [۳]

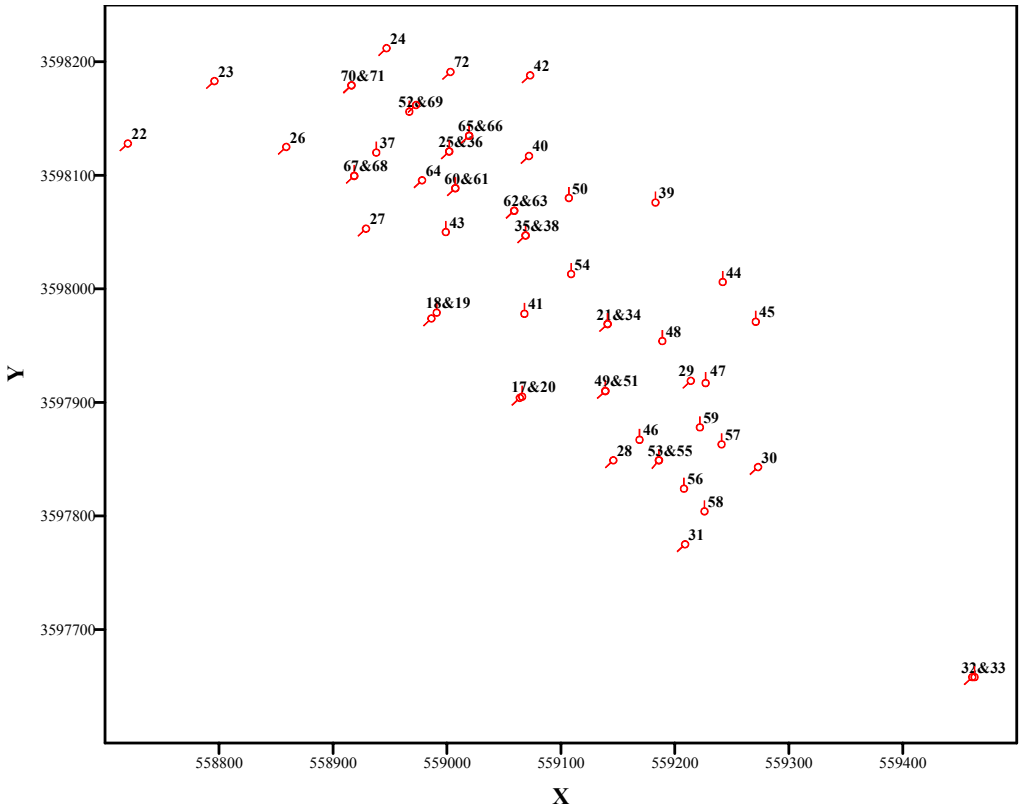


شکل ۱- فلوچارت شبیه سازی SGS [۳]

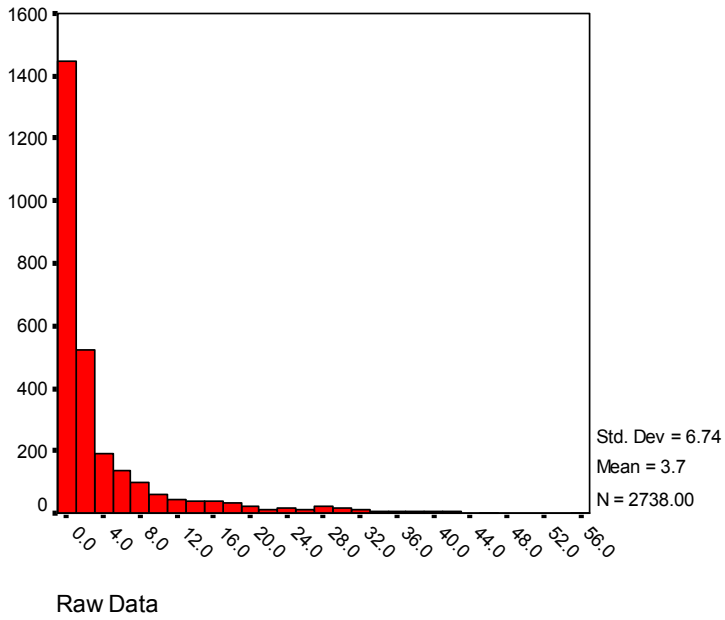
مطالعه موردی

کانسار مورد مطالعه در زون تکتونیکی فعال سنندج-سیرجان در ایران مرکزی واقع است. ماده معدنی این ذخیره در دولومیت‌های کرتاسه زیرین تمرکز یافته است . کانی سازی در این معدن غالبا به‌صورت پر شدگی حفره‌های باز می‌باشد. ماده معدنی مثل صفحه‌ای لنز مانند است که که غالبا به‌صورت ناهمگون در میان سنگ دولومیتی میزبان قرار گرفته است. در این کانسار ۵۶ حلقه گمانه حفاری شده است (شکل ۲ موقعیت این گمانه ها را نسبت به هم نشان می‌دهد).

بررسی‌های آماری انجام‌شده بروی این داده ها نشان دادند که توزیع عیار در این کانسار از چولگی (Skewness) مثبت قابل توجهی برخوردار است بطوریکه توزیع داده‌ها بسیار شبیه توزیع L می‌باشد. شکل۳ هیستوگرام این توزیع را نشان می‌دهد.

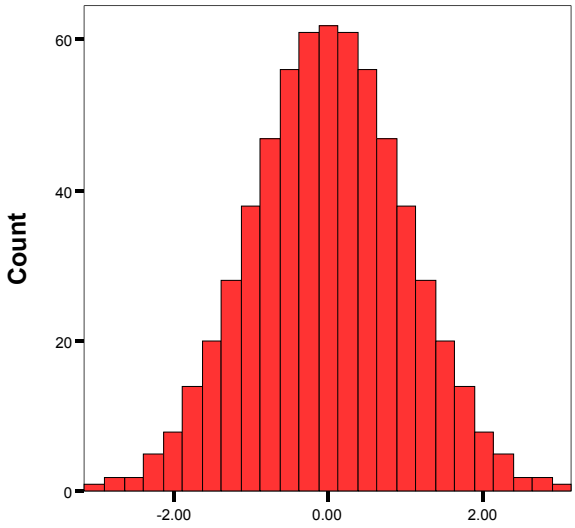


شکل۲- موقعیت گمانه‌ها (آزیموت گمانه ها نیز در شکل مشخص است)



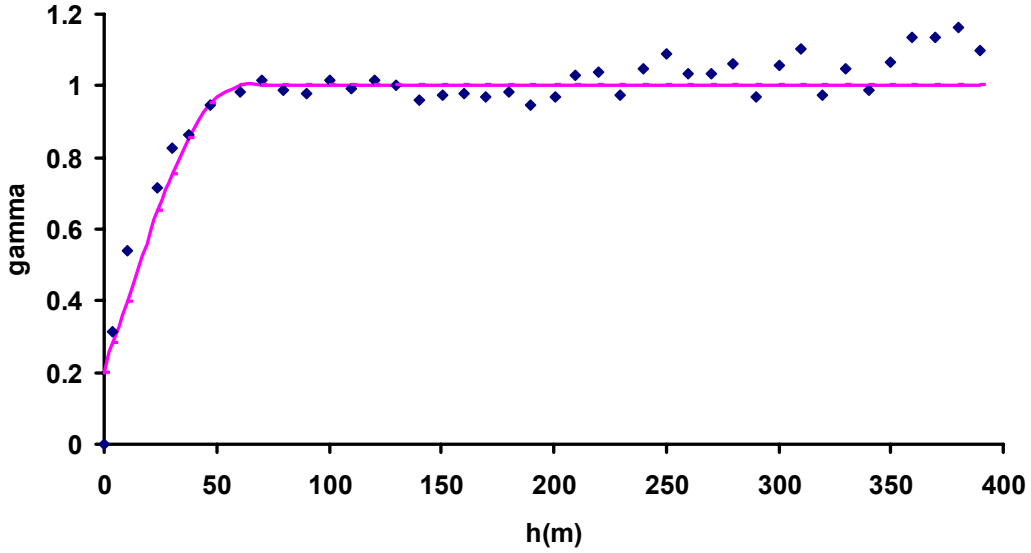
شکل۳- هیستوگرام داده‌های خام

برای شبیه سازی داده ها بروش SGS ، لازم است که داده ها در ابتدا به استاندارد نرمال تبدیل شوند . شکل۴ هیستوگرام داده های تبدیل شده به استاندارد نرمال را نشان می دهد.



شکل۴- هیستوگرام فراوانی داده‌های تبدیل شده به استاندارد نرمال

جهت تعیین ساختار منطقه واریوگرام غیر جهتی منطقه رسم می‌شود. شکل۵ واریوگرام غیر جهتی داده ها را نشان می‌دهد همانطور که مشاهده می‌شود یک مدل کروی با اثر قطعه‌ای۰/۲ ،سقف ۱ و دامنه۶۰ متر به این واریوگرام برازش می‌شود.



شکل۵- واریوگرام غیرجهتی کانسار

جدول۱- پارامترهای زمین آماری مدل‌های برازش شده به واریوگرام‌های غیر جهتی

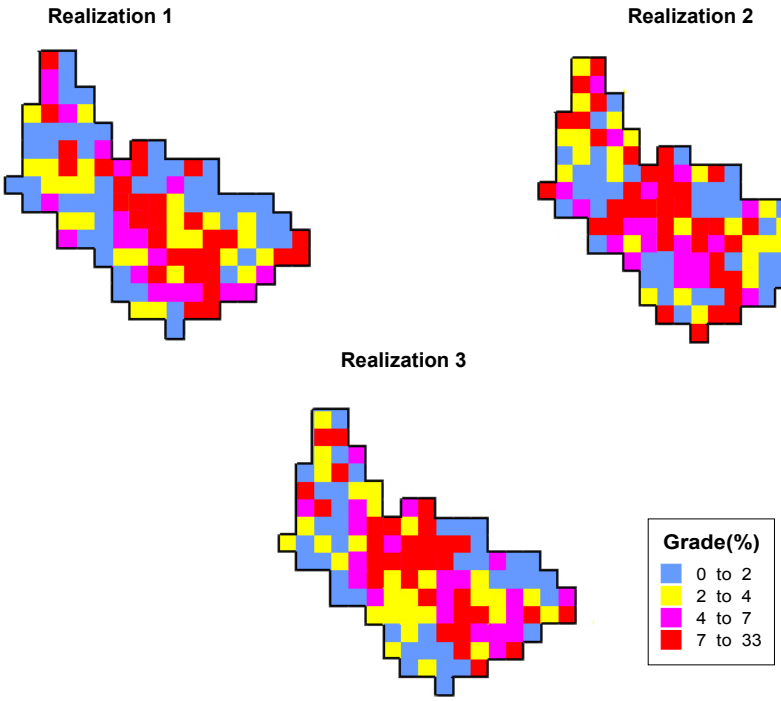
واریوگرام		مدل	دامنه(متر)	اثر قطعه‌ای(s)	سقف(s)
آزیموت(درجه)	شیب(درجه)				
۱۳۵	۴۵	کروی	۱۵۰	۰/۱	۱/۳
۴۵	۰	کروی	۶۰	۰/۲	۰/۹
۰-۳۶۰	۹۰	کروی	۳۰	۰/۱	۱/۱

جهت تشخیص آنیزوتروپی کانسار واریوگرام‌های غیر جهتی در آزیموت‌های ۰،۴۵،۹۰،۱۳۵ با شیب‌های ۰،۴۵،۹۰،۱۳۵ درجه جهت تشخیص آنیزوتروپی منطقه رسم شدند. یک واریوگرام قائم نیز جهت سنجش

آنیزوتروپی در جهت قائم رسم شد . جدول۱ پارامترهای زمین آماری مدل‌های برازش شده به واریوگرام‌هایی که آنیزوتروپی منطقه را به بهترین وجه منعکس می‌کند نشان می‌دهد.

شبیه سازی کانسار

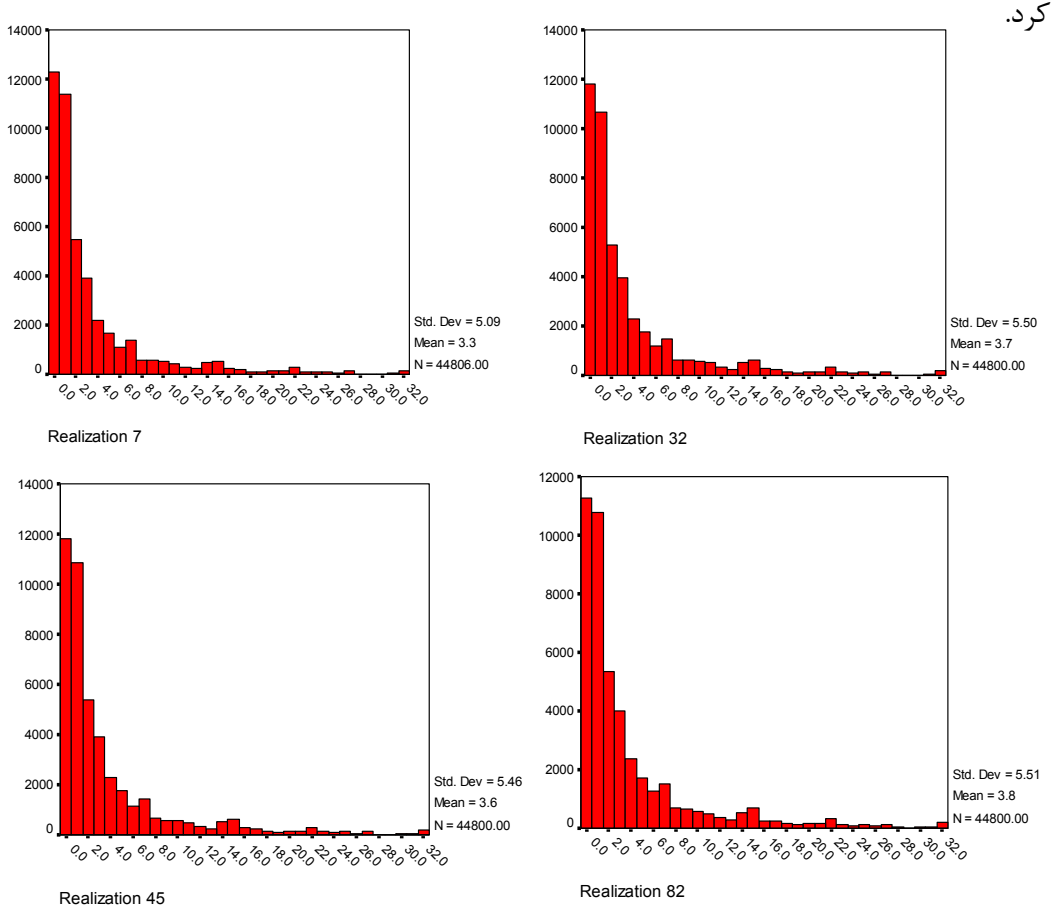
برای شبیه سازی این کانسار بروش SGS از نرم افزار دردسترسGSLIB (Geostatistical Software Library) استفاده شد.(GSLIB مجموعه‌ای از نرم افزارهای ژئواستاتیستیکی است که در دانشگاه استنفورد زیر نظر دوچ(C.V. Dutch) و ژورنل برنامه نویسی شده است). برای شبیه سازی از بلوک‌هایی به ابعاد۱۰*۲۵*۲۵ که از بهینه سازی های صورت گرفته بدست آمد استفاده شد و سپس ۱۰۰ بار شبیه سازی ،جهت بدست آمدن ۱۰۰ تحقق(Realization) بروی داده ها انجام شد . شکل ۶ یکی از ترازهای این کانسار را در سه تحقق نشان می‌دهد.



شکل ۶- نتایج شبیه سازی یکی از تراز ها در ۳ تحقق

اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی (تحقق ها) هنگامی‌قابل قبول هستند که بتوانند شباهت معین جامعه را که در اینجا همان هیستوگرام و واریوگرام جامعه می‌باشد ، دوباره تولید کنند. لذا هیستوگرام ها و واریوگرام‌های ۱۰۰ تحقق محاسبه شدند که در اینجا هیستوگرام ها و واریوگرام‌های ۴ تحقق به عنوان نمونه آورده شده‌اند. شکل۷ هیستوگرام‌های ۴ تحقق ۷، ۳۲ ، ۴۵ و ۸۲ را نشان می‌دهد. جدول۲ پارامترهای آماری این ۴ تحقق را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تحقق‌ها قادر به بازسازی هیستوگرام کانسار بوده اند. مقایسه واریوگرام‌های تحقق‌ها با مدل برازش شده به داده‌های اولیه (شکل۸ تنها نتایج ۵ تحقق را نشان می‌دهد) نشان می‌دهد که تحقق‌ها بخوبی قادر به تولید مجدد پارامترهای زمین آماری منطقه بوده‌اند و از این لحاظ نیز دارای اعتبار می‌باشند. بنابراین از آنجا که تمامی تحقق‌ها قادر به تولید مجدد پارامترهای آماری و زمین آماری منطقه بوده اند لذا تمامی آنها دارای اعتبار می‌باشند و می‌توان از آنها در تحلیل‌های بعدی استفاده کرد.

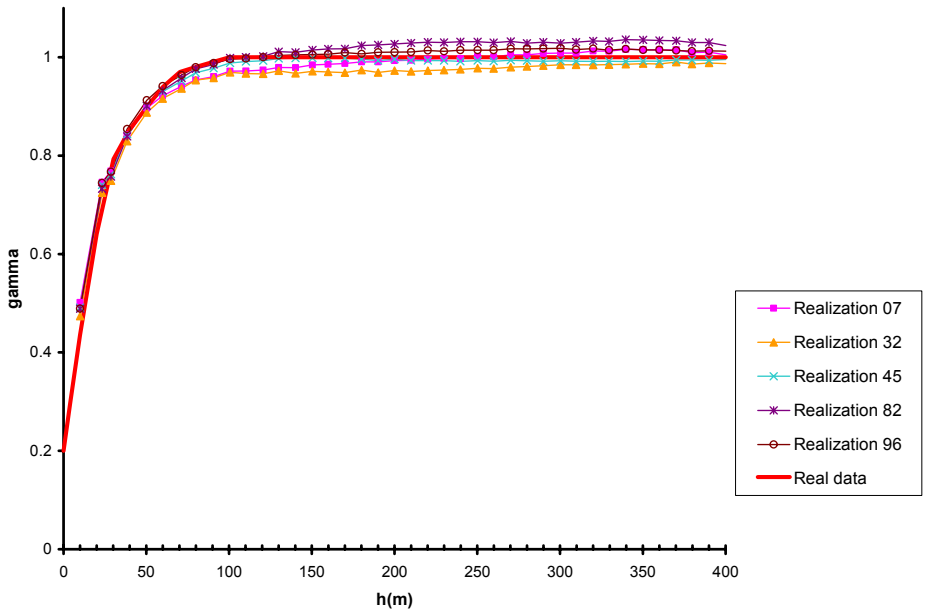


شکل۷- هیستوگرام فراوانی ۴تحقق

جدول۲- پارامترهای آماری ۴ تحقق ۷، ۳۲، ۴۵ و۸۲

(میانگین و میانه به درصد می باشند)

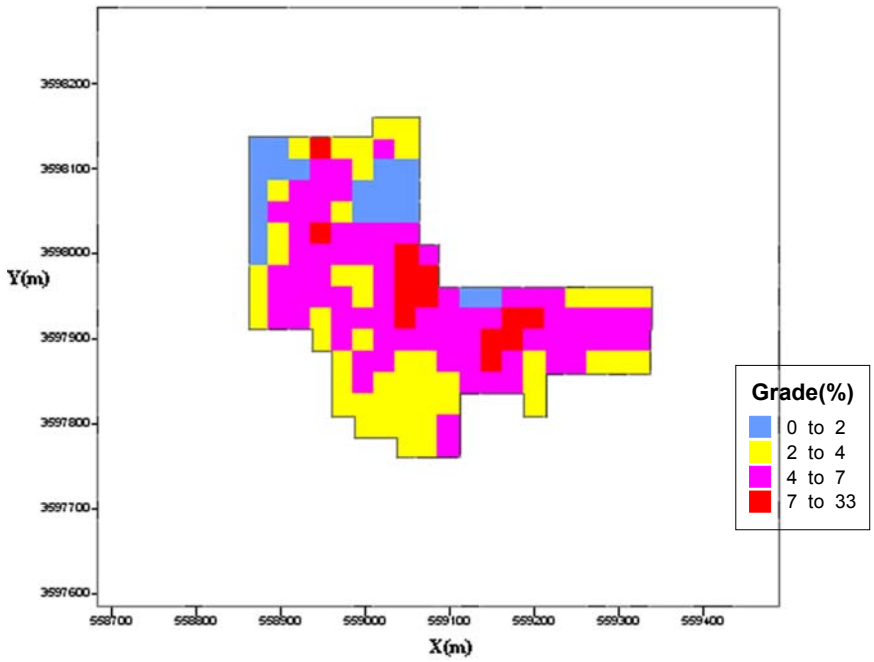
	Realization 7	Realization 32	Realization 45	Realization 82
N	44800	44800	44800	44800
Mean	3.3357	3.7002	3.6442	3.7783
Median	1.2800	1.4400	1.3800	1.5400
Std. Deviation	5.08898	5.50041	5.45581	5.50856
Kurtosis	8.383	6.927	7.220	6.661
Skewness	2.730	2.531	2.573	2.479



شکل۸- واریوگرام‌های تولید شده توسط ۵ تحقق به همراه مدل برازش شده به داده‌های اولیه (خط ممتد)

نقشه E-type

پس از اینکه تحقق ها به‌دست 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 حاصله از ۱۰۰ تحقق نشان میدهد . بدین ترتیب یک نقشه میانگین از کل منطقه حاصل می‌گردد. از آنجا که این نقشه با میانگین گیری بین ۱۰۰ تحقق حاصل شده است لذا بسیار شبیه نقشه حاصل از کریجینگ می‌باشد [۴]. شکل ۹ نقشه E-type یکی از ترازهای کانسار مورد نظر 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 ترازهای کانسار ذخیره ای معادل ۱۰/۷ میلیون تن با عیار حد ۲ درصد برای این کانسار تخمین زده می شود.



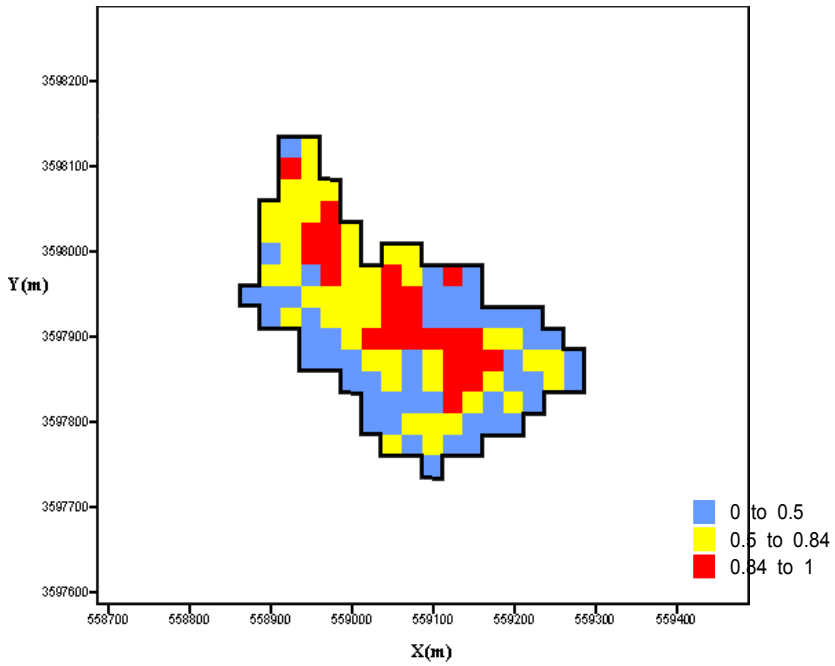
شکل۹- نقشه E-type یکی از ترازها

نقشه‌های احتمال

از جمله مهمترین نتایجی که از تحقق ها حاصل می‌شوند ،نقشه‌های احتمال (Probability Maps) می‌باشند. این نقشه ها 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 تحقق‌های ایجاد شده عبور کند، به‌دست می‌آیند. در واقع

نقشه‌های احتمال امکان برنامه ریزی‌های دقیق استخراجی را برای مهندسان معدن فراهم می‌کنند. همچنین امکان تعیین نقاط بهینه جهت اکتشافات تفصیلی تر را نیز در اختیار می‌گذارند.[۴و۵]

شکل۱۰ نقشه احتمال عبور از حد ۲ درصد عیار را در یکی از ترازها نشان می‌دهد. این نقشه بر اساس احتمال گذر از مقادیر۵۰ و ۸۴ درصد تهیه شده اند. بدین ترتیب احتمال گذر از عیار حد ۲ درصد برای تمامی بلوک های کانسار محاسبه می شود.



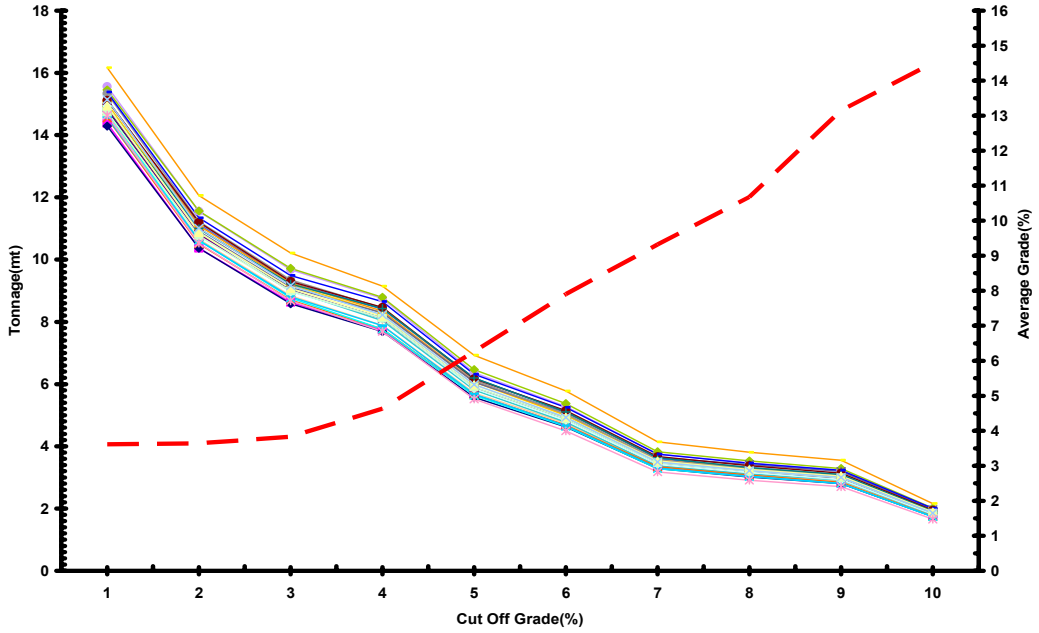
شکل۱۰- نقشه احتمال گذر عیار از حد ۲٪ دریکی از ترازهای کانسار

منحنی‌های عیار – تناژ

منحنی‌های عیار- تناژ یکی از ابزارهایی هستند که برنامه ریزان معادن را قادر به تعیین پارامترهای صحیح تر جهت برنامه ریزی‌های معدنی می‌کنند. این منحنی‌ها که از سه محور عیار حد ، عیار متوسط و تناژ تشکیل شده اند امکان تعیین عیار حد بهینه و به دنبال آن مقدار ذخیره را با توجه به عیار متوسط مورد نیاز کارخانه فرآوری فراهم می‌کنند.

از آنجایی که در شبیه سازی، تحقق‌های متعددی از کانسار ایجاد می‌شود لذا می‌توان بر اساس هر تحقق 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 پی برد. تعیین ریسک همراه با تخمین تناژ امکان برنامه

ریزی‌های دقیق را برای مهندسین معدن فراهم می‌کند. بطوریکه چنانچه حالات بحرانی نمودار به وقوع بپیوندند معدن از نظر برنامه‌های استخراجی ، فرآوری و حتی از نظر اقتصادی با مشکل مواجه نشود [۶].
رسم منحنی‌های عیار – تناژ نیازمند محاسبه تناژ برای عیارهای مختلف می‌باشد . برای محاسبه تناژ به عیار هر بلوک ، جرم مخصوص ماده معدنی و در صد بازیابی مغزه ها نیاز می‌باشد. لذا با توجه به این داده ها می‌توان به محاسبه مقدار ذخیره به ازاء عیارهای حد مختلف پرداخت. شکل۱۱ منحنی عیار – تناژ را برای کانسار مذکور نشان می‌دهد.



شکل۱۱- منحنی عیار – تناژ کانسار (خط منقطع نشان دهنده منحنی عیار متوسط- عیارحد و خطوط پیوسته نشان دهنده منحنی‌های عیارحد- تناژ برای تحقق‌های مختلف می‌باشند)

شکل۱۱ نشان می‌دهد که بطور کلی با افزایش عیار حد ،تناژ کاهش و عیار متوسط افزایش می‌یابد. فاصله بین منحنی‌های عیار حد - تناژ در این نمودار نشان می‌دهد که در عیار حدهای پایین‌تر ریسک تخمین تناژ بالاتر از ریسک همراه با تخمین مقدار ماده معدنی در عیار حدهای بالاتر است. که خود به‌علت فراوانی داده در عیارهای بالاتر می‌باشد. این منحنی قادر به تعیین محدوده احتمالی تغییرات تناژ می‌باشد . بطور مثال چنانچه عیار متوسط ۳/۶ درصد در نظر باشد ، با عیار حد ۲ درصد از ۱۰/۳۷ میلیون تن تا ۱۲/۰۶ میلیون تن امکان تغییر تناژ ماده معدنی وجود دارد. بدین ترتیب می‌توان برنامه ریزی‌های استخراجی را بگونه‌ای

بهینه نمود که تغییرات احتمالی میزان ماده معدنی در یک دوره زمانی معین خللی در اهداف معدنکاری ، ایجاد نکنند.

نتیجه گیری

شبیه سازی زمین آماری یکی از کارآمدترین روش ها در تعیین ریسک همراه با تخمین ذخیره است .این روش قادر به پیشگویی بهترین و بدترین حالت رخداد ممکنه در رابطه با عیار و تناژ ماده معدنی بوده و بدین ترتیب قادر به راهنمایی مهندسان معدن جهت برنامه‌ریزیهای دقیق‌تر استخراجی و فرآوری می‌باشد.در این کانسار با استفاده از روش شبیه‌سازیSGS ، ذخیره متوسط ۱۰/۷ میلیون تن بدست آمده است . همچنین نمودارهای احتمال رسم شده احتمال عبور از عیار حد ۲ در صد را برای هر بلوک در اختیار مهندسان استخراج معدن قرار می دهند و بدین ترتیب می توانند در بهینه سازی برنامه‌ریزی‌های استخراجی کوتاه مدت موثر باشند، از طرف دیگر نمودار عیار و تناژ نشان دهنده ریسک همراه با کل عملیات تخمین می باشد.

مراجع

[1] Dubrule,O.(2003).”Geostatistics for seismic data integration in earth models ,EAGE”:European Association of Geoscientists and Engineers , printed in US.
[2] Vann,J. and Bertoli O.and Jackson,S.(2002). “Geostatistical Simulation for Quantifying Risk”, Geostatistical Association of Australian symposium.
[3] Barbosa Queiroz, J.c. and Sturaro,J.R.and Riedel,P.S.,(2001).”Geostatistic Mapping of Arsenic,Manganese and Iron Contamination Risk in the Port of Santana,Apama,Brazil” , universidate Estadual Palista,Brazil.
[4] 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 .
[5] Deustch, C. V.,(2002). “Geostatistical Reservoir modeling”.Oxford University Press ,New York ,371 pp.
[6] Dimitrakopoulos R. , Fonseca M. B. ,(2003) , “Assessing Risk in Grade- Tonnage Curves in a Complex Copper Deposite , Northern Brazile , Based on an Efficient Joint Simulation of Multiple Correlated Variables “, APCOM , pp 373-382.