به نام خداوند جان و خرد

ارزیابی ذخایر معدنی

مدرس: پیمان افضل

نیمسال دوم تحصیلی ۱۳۹۰-۱۳۹۱

انواع روش‌های ارزیابی ذخیره

- **روش‌های سنتی یا هندسی یا ترسیمی**

این روش‌ها مبتنی بر اصول بدیهی هندسی هستند و به هیچ وجه در آنها بحث چگونگی توزیع فضایی عیار اهمیتی ندارد.

- **روش‌های مدرن (مجذور عکس فاصله و زمین‌آمار)**

در این روش‌ها بحث توزیع عیار در جهت‌های مختلف در فضا حایز اهمیت است. این مساله به‌خصوص برای جدایش بخش پرعیار و کم‌عیار در ماده‌معدنی و بخش‌های مختلف با عیارهای حدمختلف و بحث جدایش درست کانه از باطله بسیار اهمیت دارد.

فرض‌های روش‌های سنتی

- در این روش‌ها فرض بر پیوستگی است.
- فرض دوم تغییرپذیری خطی و تدریجی ضخامت کانسنگ و باطله است.
- شعاع تاثیر داده‌ها مساوی در نظر گرفته‌می‌شود. یعنی شعاع تاثیر یک داده در گمانه‌ای تا نصف فاصله آن گمانه تا گمانه مجاور است.

مسایل کمکی برای کارشناسی ارشد در فرضیه پیوستگی

- برای اکتشاف یک لایه سه گمانه A، B و C به ترتیب در یک امتداد حفر شدند. فاصله AB برابر ۱۵۰ متر و فاصله BC برابر ۲۰۰ متر است. ضخامت لایه در سه گمانه A، B و C به ترتیب برابر ۸، ۲ و ۶ متر است. از دو نقطه M و N در دو طرف نقطه B و به فاصله ۵۰ متری آن در جهت‌های AB و BC قرار است دو گمانه دیگر حفر شود. براساس قانون تغییرات تدریجی اختلاف ضخامت دو لایه در گمانه‌های M و N چقدر پیش‌بینی می‌شود؟ (کنکور ۱۳۸۸)
- بر اساس قانون تغییرات تدریجی می‌توان از نسبت و تناسب استفاده نمود. یعنی برای بدست‌آوردن ضخامت در نقطه M که در ۵۰ متری نقطه B و بین دو نقطه A و B قرار گرفته‌است باید نخست اختلاف ضخامت لایه در دو نقطه A و B را بدست آورد که برابر ۶ متر می‌باشد یعنی اختلاف ضخامت لایه در دو گمانه در فاصله ۱۵۰ متری از یکدیگر ۶ متر می‌شود. حال باید تناسب بست. یعنی در یک فاصله ۱۵۰ متری اختلاف ضخامت ۶ متر است ولی اگر این فاصله به ۵۰ متر برسد این چقدر می‌شود؟ از رابطه زیر این امر حساب می‌شود یعنی:

$$(۶\times۵۰)/۱۵۰ = ۲۰ \text{ متر}$$

- یعنی اختلاف ضخامت بین دو نقطه M و B برابر ۲ متر می‌باشد. چون در نقطه B ضخامت لایه برابر ۲ متر است پس در نقطه M ضخامت برابر ۴ متر می‌باشد.

مسایل کمکی برای کارشناسی ارشد فرضیه پیوستگی

- بر اساس قانون تغییرات تدریجی می‌توان از نسبت و تناسب استفاده نمود. یعنی برای بدست‌آوردن ضخامت در نقطه N که در ۵۰ متری نقطه B و بین دو نقطه C و B قرار گرفته‌است باید نخست اختلاف ضخامت لایه در دو نقطه C و B را بدست آورد که برابر ۴ متر می‌باشد یعنی اختلاف ضخامت لایه در دو گمانه در فاصله ۲۰۰ متری از یکدیگر ۴ متر می‌شود. حال باید تناسب بست. یعنی در یک فاصله ۲۰۰ متری اختلاف ضخامت ۴ متر است ولی اگر این فاصله به ۵۰ متر برسد این چقدر می‌شود؟ از رابطه زیر این امر حساب می‌شود یعنی:
- ۱ متر = ۲۰۰/ (۵۰×۴)
- یعنی اختلاف ضخامت بین دو نقطه N و B برابر ۱ متر می‌باشد. چون در نقطه B ضخامت لایه برابر ۲ متر است پس در نقطه N ضخامت برابر ۳ متر می‌باشد.
- بر این اساس اختلاف ضخامت لایه در دو نقطه M و N برابر ۱ متر می‌شود.

تعریف درون‌یابی و برون‌یابی

- درون‌یابی به تخمین یک پارامتر که در اطراف آن وجود دارد گویند.
- در جایی‌که در یک سمت گمانه اکتشافی گمانه دیگری برای درون‌یابی وجودندارد عمل برون‌یابی صورت می‌گیرد که در روش‌های سنتی مقدار آن حدود ۰/۲۵ فاصله بین داده ها است.

کامپوزیت‌سازی نمونه‌ها

- نمونه‌ها برای ارزیابی ذخیره باید دارای یک پایه باشند، یعنی باید دارای طول یا وزن یکسان باشد ولی در بیشتر موارد اینگونه نمی‌باشد. به‌همین‌جهت باید یکسان‌سازی یا کامپوزیت‌سازی صورت‌گیرد. اینکار براساس فرمول زیر است:

$$\frac{\text{SUM}\,(t_i \times C_i)}{\text{SUM}\,(t_i)}$$

- t_i ضخامت مغزه iام و C_i عیار متوسط نمونه گرفته‌شده از مغزه iام است.

انواع روش‌های سنتی ارزیابی ذخیره

- روش مقاطع
- روش مثلث‌بندی
- روش چندضلعی
- روش استفاده از هیپسوپلان (نقشه هم‌ارتفاع)

روش مقاطع

- در این روش نخست نیمرخ‌ها یا پلان‌های کانسار ترسیم می‌شوند. سپس مساحت آنها محاسبه‌می‌شود و سپس با استفاده از دو رابطه‌ریاضی حجم بین آنها بدست‌می‌آید. به‌طورمعمول از نیمرخ‌های‌عمودی در این روش استفاده‌می‌شود. اگر سطح دو نیمرخ یا پلان باهم کمتر از ۳۰٪ اختلاف داشته‌باشند، برای ارزیابی حجم بین ایندو مقطع از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{(S1+S2)\times h}{2}$$

روش مقاطع

- اما اگر اختلاف بین مساحت ایندو مقطع بیش از ۳۰٪ باشد، حجم بین ایندو از فرمول زیر حساب‌می‌شود:

$$\frac{(S1+S2+(S1\times S2)^{0.5})\times h}{3}$$

- وقتی که حجم بدست‌آمد، با ضرب آن در وزن‌مخصوص تناژ کانسنگ در این حجم و با ضرب این مقدار در عیار متوسط میزان ماده‌معدنی در این حجم محاسبه می‌شود.

مثالی از روش مقاطع

- در یک محدوده اکتشافی سه نیمرخ ۱ و ۲ و ۳ برداشت‌شده‌است. مشخصات سه نیمرخ به شرح زیر است:
- نیمرخ ۱) مساحت ماده‌معدنی ۱۰۰ مترمربع، عیار ماده معدنی ۲/۵ درصد، وزن‌مخصوص ماده‌معدنی ۳ تن بر مترمکعب
- نیمرخ ۲) مساحت ماده‌معدنی ۱۲۰ مترمربع، عیار ماده معدنی ۳/۵ درصد، وزن‌مخصوص ماده‌معدنی ۳/۳ تن بر مترمکعب
- نیمرخ ۳) مساحت ماده‌معدنی ۳۰۰ مترمربع، عیار ماده معدنی ۳/۱ درصد، وزن‌مخصوص ماده‌معدنی ۳/۲ تن بر مترمکعب
- فاصله نیمرخ ۱ از نیمرخ ۲ برابر ۱۰۰ متر و نیمرخ ۲ از نیمرخ ۳ برابر ۱۵۰ متر است. با استفاده از روش مقاطع میزان تناژ ماده‌معدنی و همچنین میزان فلز محتوی را محاسبه نمایید.

مثالی از روش مقاطع

- جواب اینکه اول باید اختلاف مساحت بین هر دو مقطع مجاور را پیدا کنیم. بین دو مقطع ۱ و ۲ و دو مقطع ۲ و ۳. با بدست آوردن اختلاف دو مقطع و تقسیم آن بر مساحت مقطع بزرگتر ضربدر ۱۰۰.
- برای دو مقطع ۱ و ۲:
- ۱۶/۶۶ = ۱۰۰ ×۱۲۰/ (۱۰۰-۱۲۰)
- یعنی چون زیر ۳۰ درصد اختلاف مساحت دارند از فرمول اول استفاده می‌شود.

مثالی از روش مقاطع

- برای دو مقطع ۲ و ۳:
- ۶۰ = ۱۰۰ ×۳۰۰/ (۱۲۰-۳۰۰)
- یعنی چون بالای ۳۰ درصد اختلاف مساحت دارند از فرمول دوم استفاده می‌شود.
- حجم بین دو مقطع ۱ و ۲: m^3 ۱۱۰۰۰=۱۰۰×۲/ (۱۲۰+۱۰۰)
- حجم بین دو مقطع ۲ و ۳: m^3 ۳۰۴۸۶=۱۵۰×۳/ (۱۸۹+۴۲۰)
- حالا باید بین هر دو مقطع وزن‌مخصوص متوسط حساب شود.
- برای اینکار میانگین وزن‌مخصوص ماده‌معدنی برای حجم بین مقاطع ۱ و ۲ و نیز مقاطع ۲ و ۳ حساب می‌شود.
- وزن‌مخصوص میانگین برای حجم بین مقاطع ۱ و ۲: t/m^3 ۳/۱۵
- وزن‌مخصوص میانگین برای حجم بین مقاطع ۲ و ۳: t/m^3 ۳/۲۵

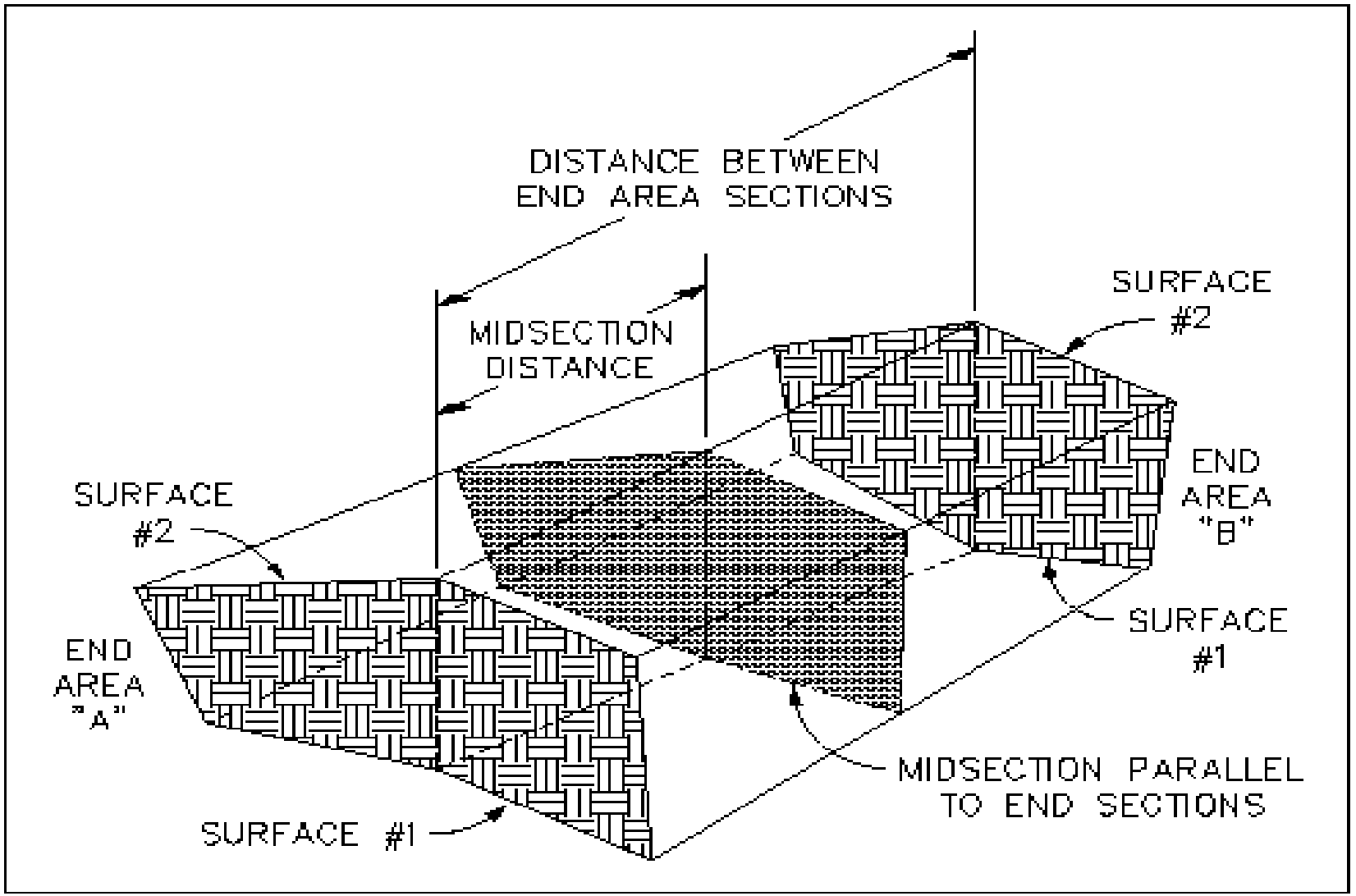
مثالی از روش مقاطع

- تناژ بین دو مقطع ۱ و ۲: ۳۴۶۵۰ t = ۳/۱۵× ۱۱۰۰۰
- تناژ بین دو مقطع ۲ و ۳: ۹۹۰۸۰ t =۳/۲۵× ۳۰۴۸۶
- تناژ مجموع کانسنگ: ۱۳۳۷۳۰ t = ۳۴۶۵۰ + ۹۹۰۸۰
- برای بدست‌آوردن میزان فلز محتوی باید میزان عیار متوسط بین مقاطع ۱ و ۲ و نیز مقاطع ۲ و ۳ را حساب نمود.
- عیار میانگین برای حجم بین مقاطع ۱ و ۲: ۳ درصد
- عیار میانگین برای حجم بین مقاطع ۲ و ۳: ۳/۳ درصد
- با ضرب عیار میانگین در تناژ کانسنگ، میزان فلز محتوی در دو بخش بین مقاطع ۱ و ۲ و نیز مقاطع ۲ و ۳ محاسبه می‌شود.

مثالی از روش مقاطع

- فلز محتوی بین دو مقطع ۱ و ۲: ۱۰۳۹/۵ t = ۰/۰۳ × ۳۴۶۵۰
- فلز محتوی بین دو مقطع ۲ و ۳: ۳۹۶۹/۶ t=۰/۰۳۳ × ۹۹۰۸۰
- فلز محتوی مجموع کانسار: ۵۰۰۹/۱ t = ۳۹۶۹/۶ + ۱۰۳۹/۵

تصویری از دو نیمرخ مجاور مورداستفاده در روش مقاطع



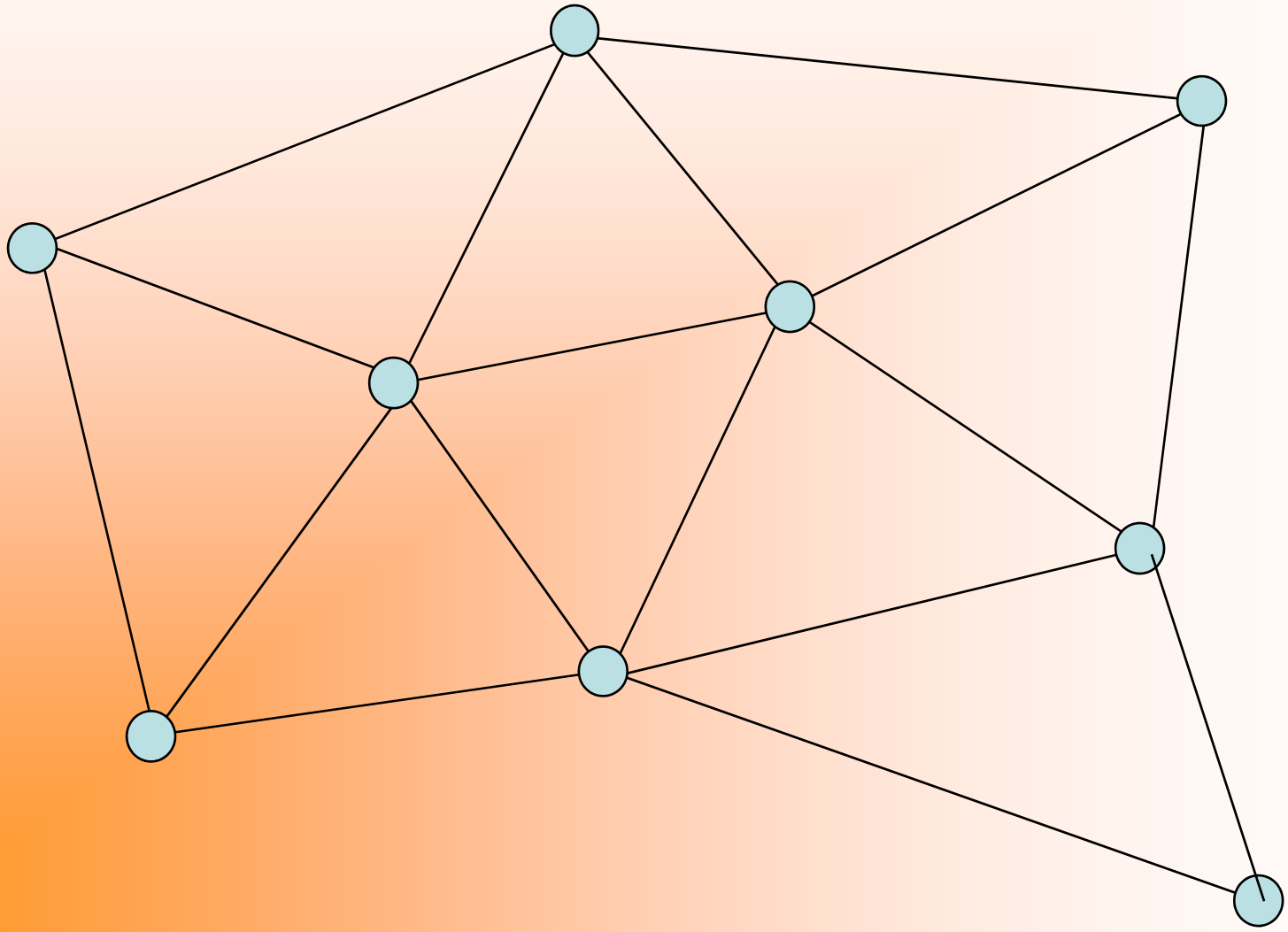
روش مثلث‌بندی

- در این روش گمانه‌های مجاور را به یکدیگر وصل و مثلث‌بندی نموده و با درنظر گرفتن فرض منشوری‌بودن هر بلوک مثلثی حجم را در آنها حساب می‌کنند. فرمول این روش به صورت زیر است:

$$\frac{(t_1+t_2+t_3)\times S}{3}$$

- عیار و وزن‌مخصوص متوسط بدست‌آمده با روش کامپوزیت‌سازی را در این حجم می‌توان ضرب نمود و میزان تناژ کانسنگ و میزان ماده‌معدنی را محاسبه‌نمود.

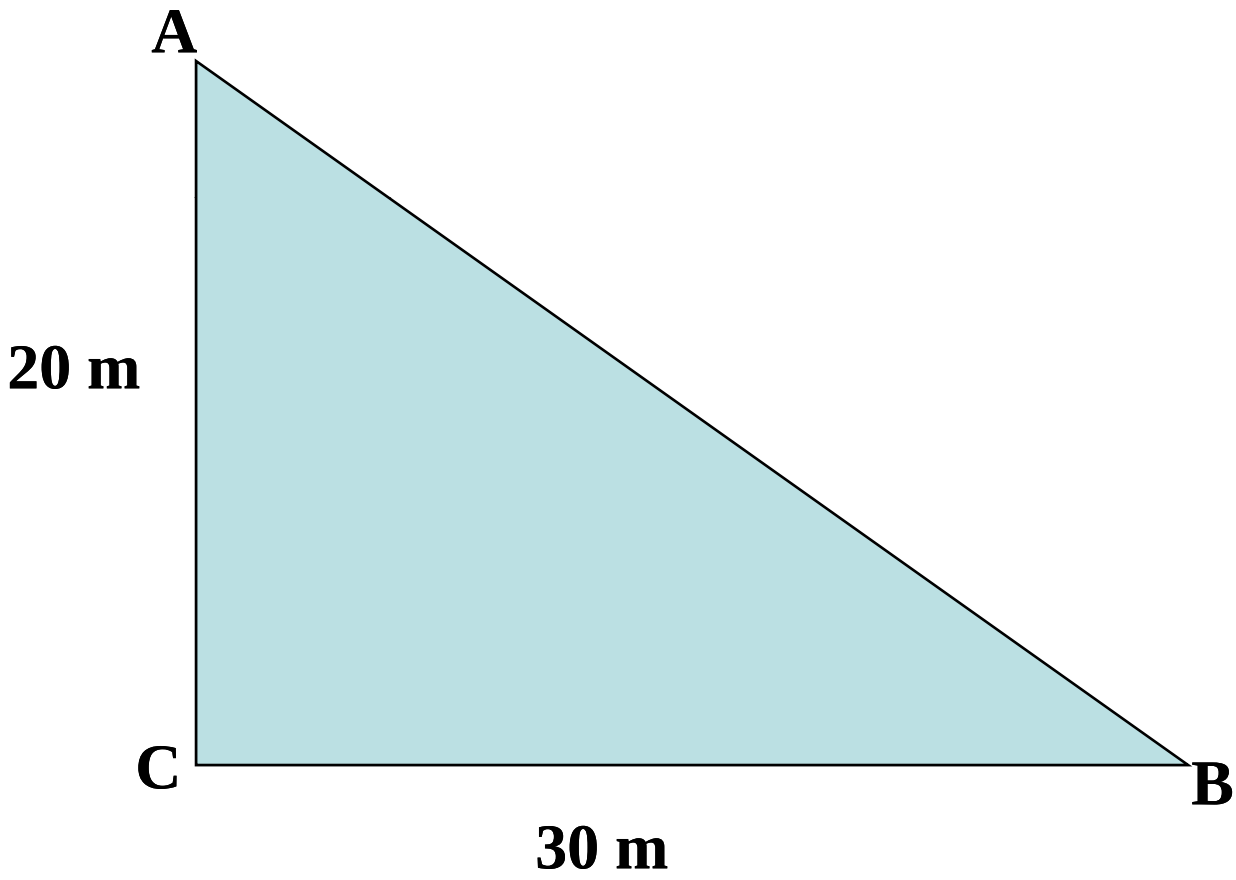
نمایی از روش مثلث‌بندی



مثالی از روش مثلث‌بندی

- در شکل زیر ۳ گمانه اکتشافی A، B و C حفرشده‌اند. ضخامت ماده‌معدنی در این گمانه‌ها به ترتیب برای گمانه A ۳ متر با عیار متوسط ۱۰٪، گمانه B ۵ متر با عیار متوسط ۱۵٪ و گمانه C ۱۰ متر با عیار متوسط ۳۵٪ می‌باشد. در صورتی که وزن‌مخصوص ماده‌معدنی برابر ۵ تن بر مترمکعب باشد، میزان تناژ ماده‌معدنی و فلز محتوی در این کانسار را به روش مثلث‌بندی محاسبه نمایید.

مثالی از روش مثلث‌بندی



مثالی از روش مثلث‌بندی

- نخست مساحت مثلث را باید حساب کرد. یعنی قاعده ضربدر نصف ارتفاع که برابر می‌شود با m^2 ۳۰۰.
- پس از آن باید متوسط ضخامت ماده‌معدنی در سه گمانه را محاسبه نمود که برابر ۶ متر می‌شود. این طبق فرمول در مساحت ضرب می‌شود و نتیجه برابر با ۱۸۰۰ مترمکعب حجم ماده‌معدنی.
- چون وزن‌مخصوص یکسان است و برابر ۵ تن بر مترمکعب این در حجم کانسنگ ضرب می‌شود و تناژ کانسنگ می‌شود برابر ۹۰۰۰ تن.

مثالی از روش مثلث‌بندی

- اما برای بدست‌آوردن میزان فلز محتوی باید عیارمتوسط را بدست‌آورد که این عیار باید با کمک کامپوزیت‌سازی محاسبه شود چون ضخامت ماده‌معدنی در گمانه‌های گوناگون متفاوت است.
- به این صورت عمل می‌کنیم که مجموع ضرب ضخامت ماده‌معدنی در عیار برای هر گمانه تقسیم بر مجموع طول ماده‌معدنی در مغزه‌ها یعنی (۳×۰/۱ + ۵×۰/۱۵ + ۱۰×۰/۳۵) تقسیم بر ۱۸. میزان عیار متوسط بدست‌امده حدود ۲۶ درصد می‌شود.
- با ضرب عیار متوسط یعنی ۰/۲۶ در ۹۰۰۰ تن ماده‌معدنی میزان فلزمحتوی بدست می‌اید که برابر است با ۲۳۴۰ تن.

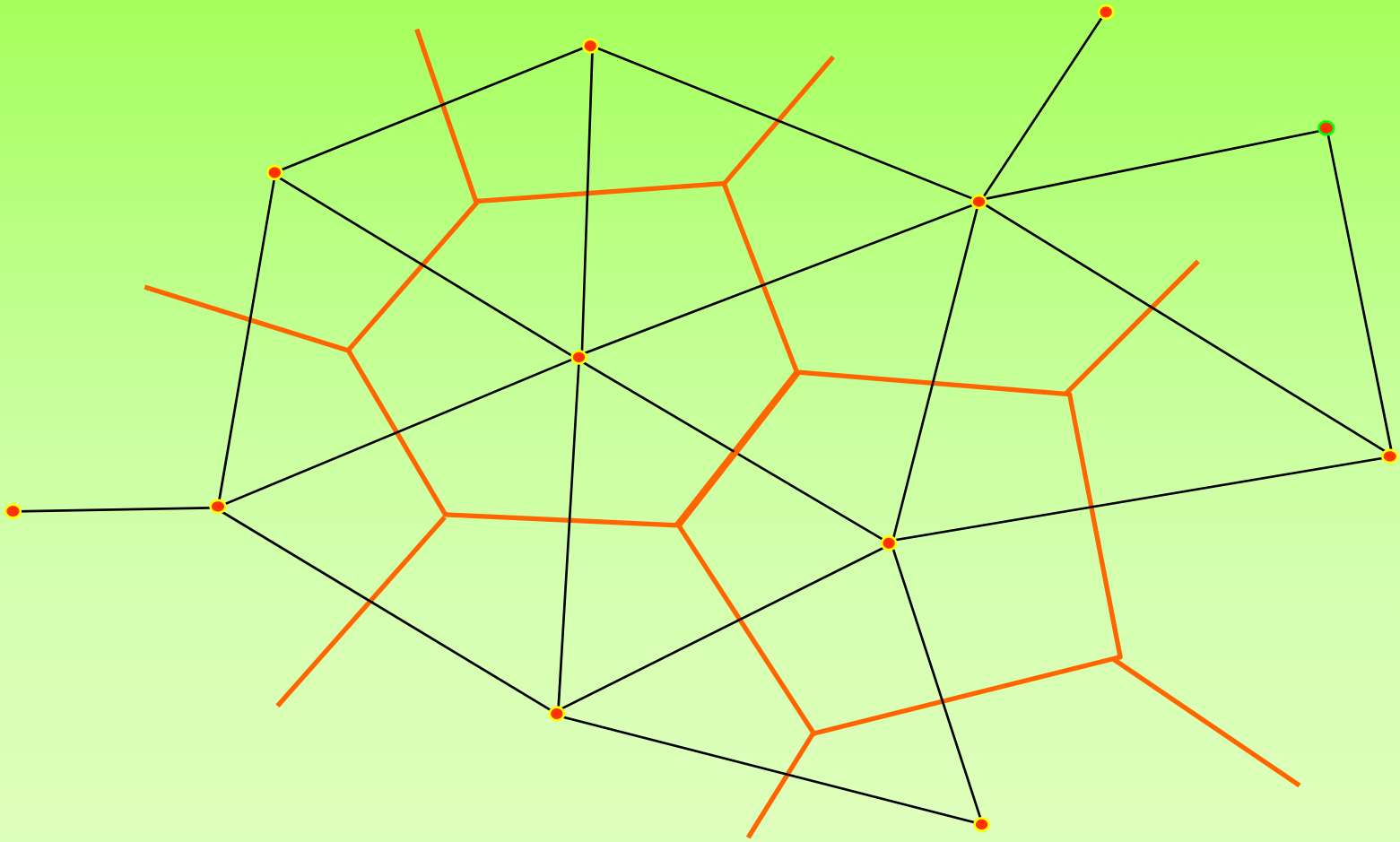
روش چندضلعی

- این روش مانند روش مثلث‌بندی است، بااین‌تفاوت که در این روش به‌جای مثلث‌بندی، کانسار را به چندضلعی‌هایی بخش می‌شود. در این روش اساس شبکه حفاری است نه ساختار کانسار. نخست گمانه‌ها به‌هم متصل و سپس عمودمنصف‌های این خطوط ترسیم می‌شوند. با برخورد این عمودمنصف‌ها به یکدیگر در اطراف یک گمانه یک چندضلعی تشکیل می‌شود و در هر یک از اینها منشوری از ماده‌معدنی در نظر گرفته‌می‌شود.
- فرمول این روش برای محاسبه تناژ کانسنگ اینگونه است:

$$W=SUM\ (S_i t_i \gamma_i)$$

- در این فرمول S مساحت چندضلعی، t ضخامت ماده‌معدنی و γ میزان وزن‌مخصوص ماده‌معدنی در چندضلعی است.

نمایی از روش چندضلعی



مثالی از روش چندضلعی

- در یک کانسار منگنز ارزیابی‌ذخیره به روش چندضلعی صورت گرفته‌است. مشخصات چندضلعی‌ها و گمانه‌های محصور در آنها به شرح جدول زیر است. میزان منگنز محتوی در این کانسار را تا عمق ۵۰ متری حساب نمایید.

مثالی از روش چندضلعی

شماره چندضلعی	شماره گمانه	مساحت چندضلعی (مترمربع)	عمق قرارگیری ماده معدنی (متر)	عیار متوسط (درصد)	وزن‌مخصوص متوسط (تن بر مترمکعب)
۱	۱	۲۰	از ۱۰ تا ۱۵	۵	۲/۵
۲	۲	۳۰	۲۰ تا ۳۰	۷	۲/۷
۳	۳	۲۵	۵۱ تا ۵۳	۶/۵	۲/۶
۴	۴	۳۵	۱۷ تا ۲۳	۸	۲/۸
۵	۵	۴۰	۴۷ تا ۵۰	۷/۶	۲/۷۵
۶	۶	۳۰	۵۳ تا ۵۶	۸	۲/۸

مثالی از روش چندضلعی

- نخست اینکه دو بخش از ماده‌معدنی که دارای عمقی بیش از ۵۰ متر هستند از مطالعات کنار گذاشته می‌شوند.
- سپس به ترتیب برای دیگر چندضلعی‌ها میزان کانسنگ و منگنز محتوی را براساس فرمول حساب می‌کنیم. برای تعیین ضخامت ماده‌معدنی از تفاضل عمق‌های قرارگیری ماده‌معدنی استفاده می‌کنیم. مثلا برای چندضلعی شماره یک ضخامت ماده‌معدنی از تفاضل کمربالا و کمرپایین ماده‌معدنی یعنی عمق‌های ۱۰ و ۱۵ متر می‌شود ۵ متر.

مثالی از روش چندضلعی

- تناژ کانسنگ برای هر چندضلعی به شرح زیر است:
- برای شماره ۱: تن ۲۵۰ = ۲۰×۵×۲/۵
- برای شماره ۲: تن ۸۱۰ = ۳۰×۱۰×۲/۷
- برای شماره ۳: تن ۵۸۸ = ۳۵×۶×۲/۸
- برای شماره ۴: تن ۳۳۰ = ۴۰×۳×۲/۷۵
- یعنی تناژ کانسنگ در مجموع تا عمق ۵۰ متری برابر ۱۹۷۸ تن است.

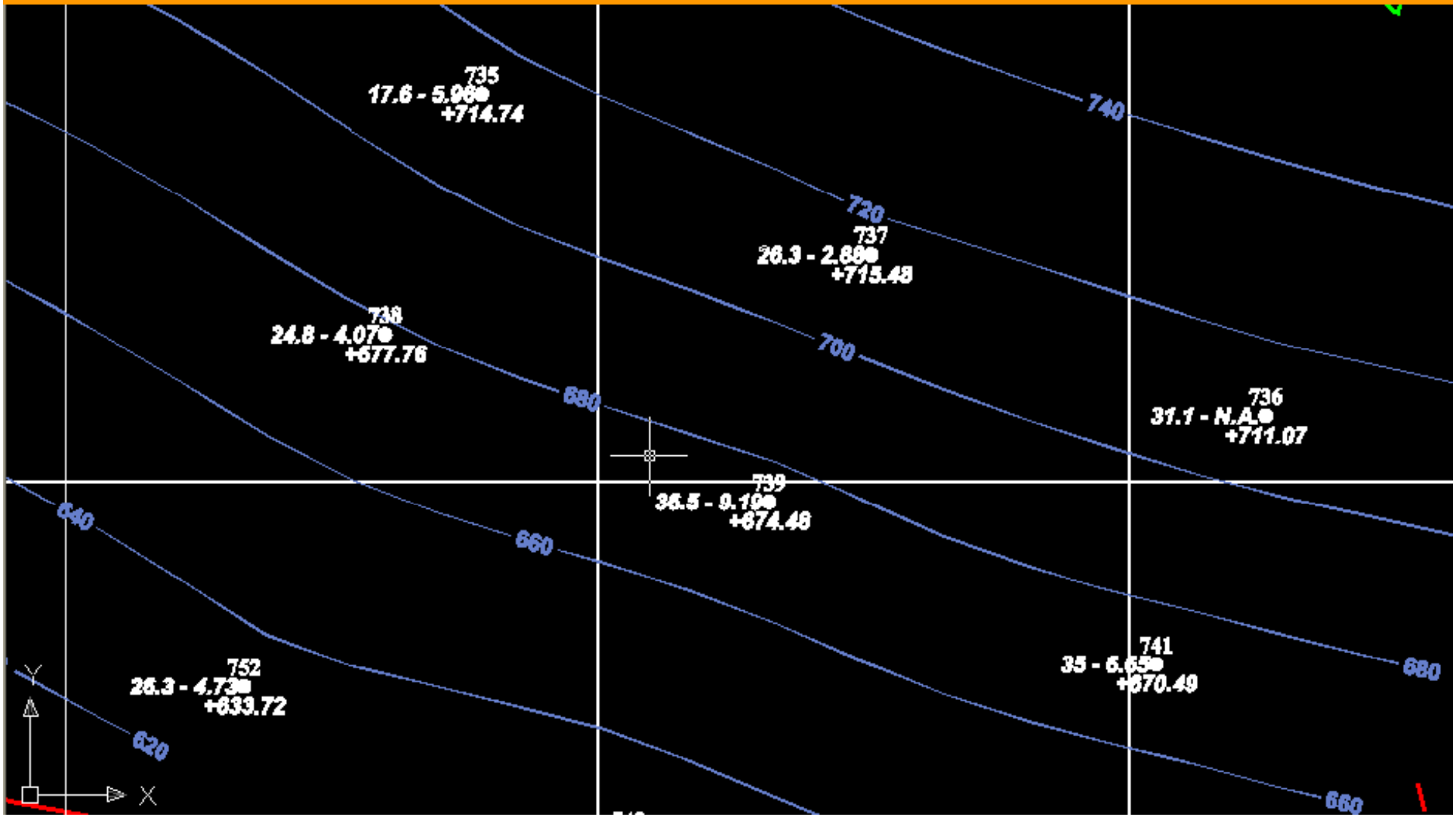
مثالی از روش چندضلعی

- اما برای محاسبه میزان فلز محتوی میزان کانسنگ بدست‌آمده برای هر چندضلعی باید در عیار متوسط آن ضرب شود.
- برای شماره ۱: تن ۱۲/۵ = ۰/۰۵×۲۵۰
- برای شماره ۲: تن ۵۶/۷ = ۰/۰۷×۸۱۰
- برای شماره ۳: تن ۴۷/۰۴ = ۰/۰۸×۵۸۸
- برای شماره ۴: تن ۲۵/۰۸ = ۰/۰۷۶×۳۳۰
- در مجموع فلز محتوی در این کانسار تا عمق کمتر از ۵۰ متر برابر ۱۴۱/۳۲ تن است.

روش استفاده از نقشه‌های‌هم‌ارتفاع (هیپسوپلان)

- در این روش نقشه توپوگرافی ماده‌معدنی در زیر سطح با استفاده از داده‌های حفاری یا ژیوفیزیکی ترسیم‌می‌شود و با تلفیق آن با نقشه‌های هم‌ضخامت و هم‌عیار می‌توان میزان ذخیره کانسار را بدست‌آورد. این روش در کانسارهای لایه‌ای به‌خصوص زغال‌سنگ نازک‌لایه به‌کار می‌رود. به این روش مدلسازی دوبعدی یک لایه نیز می‌گویند.

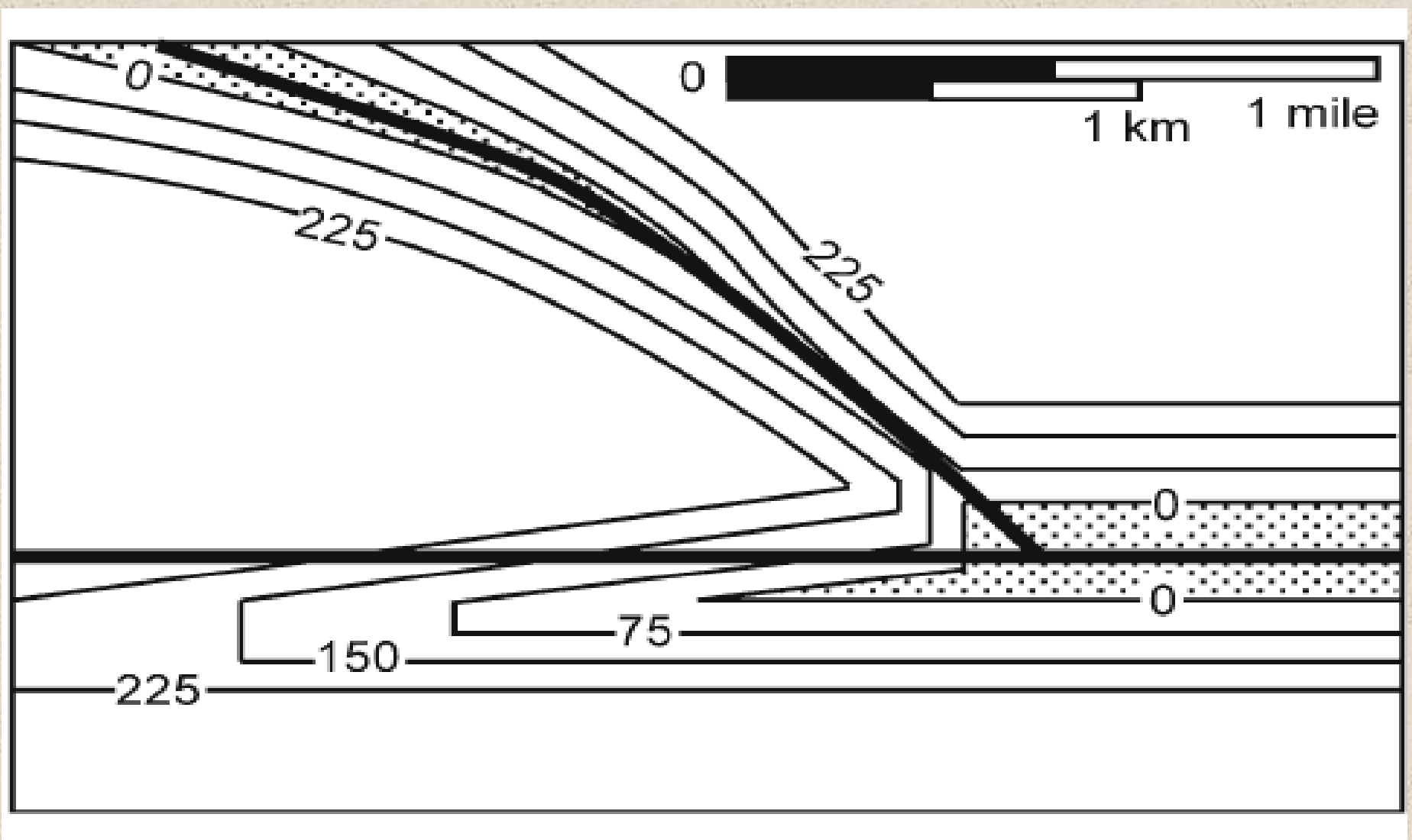
نمایی از یک هیپسوپلان



مراحل گوناگون تهیه یک هیپسوپلان

- محاسبه مختصات قرارگیری کمربالای لایه موردنظر
- تخمین و درونیابی ارتفاع بخش‌های گوناگون کمربالای لایه موردنظر بین نقاط معلوم با استفاده از الگوریتمهایی مانند مثلث‌بندی
- نکته مهم این است که برای ترسیم نقشه هم‌ضخامت یا هم‌عیار در لایه مربوطه به جای ارتفاع لایه باید میزان عیار و نیز میزان ضخامت آورده شود.

نمایی از یک نقشه هم‌ضخامت (Isopach)



روش‌های جدید ارزیابی ذخیره

- همانگونه که در روش‌های سنتی دیده‌شد، اینها بیشتر تابع شبکه برداشت هستند و بحث ساختار کانسار و توزیع فضایی داده‌ها در انها اهمیت چندانی ندارد. به‌همین‌جهت استفاده از این روش‌ها در مراحل تفصیلی اکتشاف می‌تواند سبب یک فاجعه در ارزیابی درست ذخیره و همچنین طراحی معدن بشود.
- در آمار کلاسیک داده‌ها از یکدیگر مستقلند ولی در اکتشاف موادمعدنی مشخص شده داده‌ها باتوجه به نوع کانسار و فواصلشان از یکدیگر بر یکدیگر تاثیر دارند. این سبب ایجاد دانشی به نام زمین‌آمار شده‌است.

تعاریف میانگین، مد و میانه

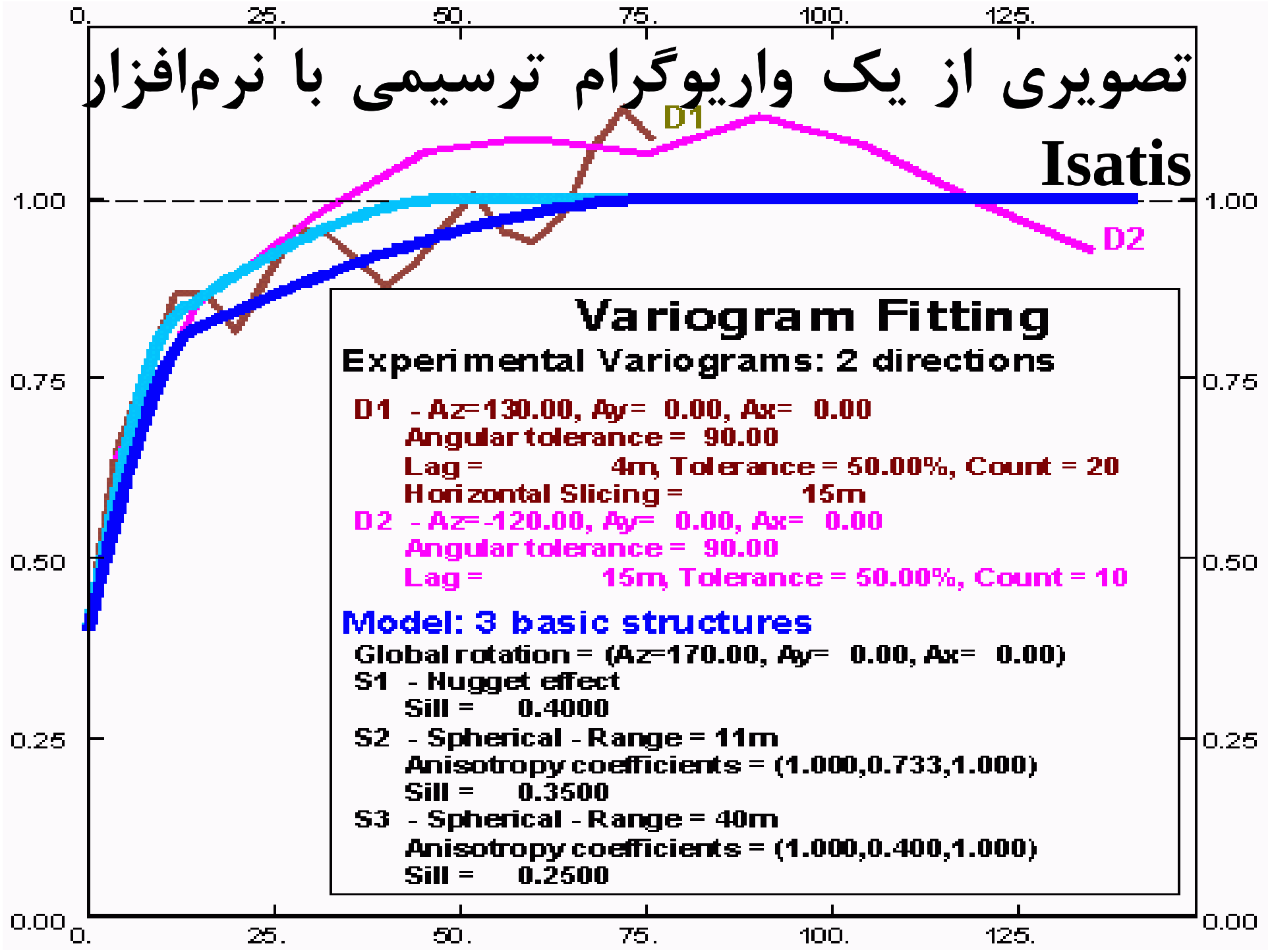
- مقدار متوسط یکسری داده را گویند، میانگین به دو نوع حسابی و هندسی بخش می‌شود.
- مد مقداری از متغیر تصادفی استکه بیشترین فراوانی را در توزیع دارد.
- میانه نقطه وسط توزیع از نظر تعداد رخداد است، به‌طوری‌که نیمی از جامعه مقادیر کمتر و نیمی دیگر مقادیری بیشتر از میانه را دارا می‌باشند.
- اگر توزیع نرمال باشد هر سه یک عدد را نشان می‌دهند.

تعاریف واریانس (پراش)، انحراف‌معیار و ضریب‌تغییرات

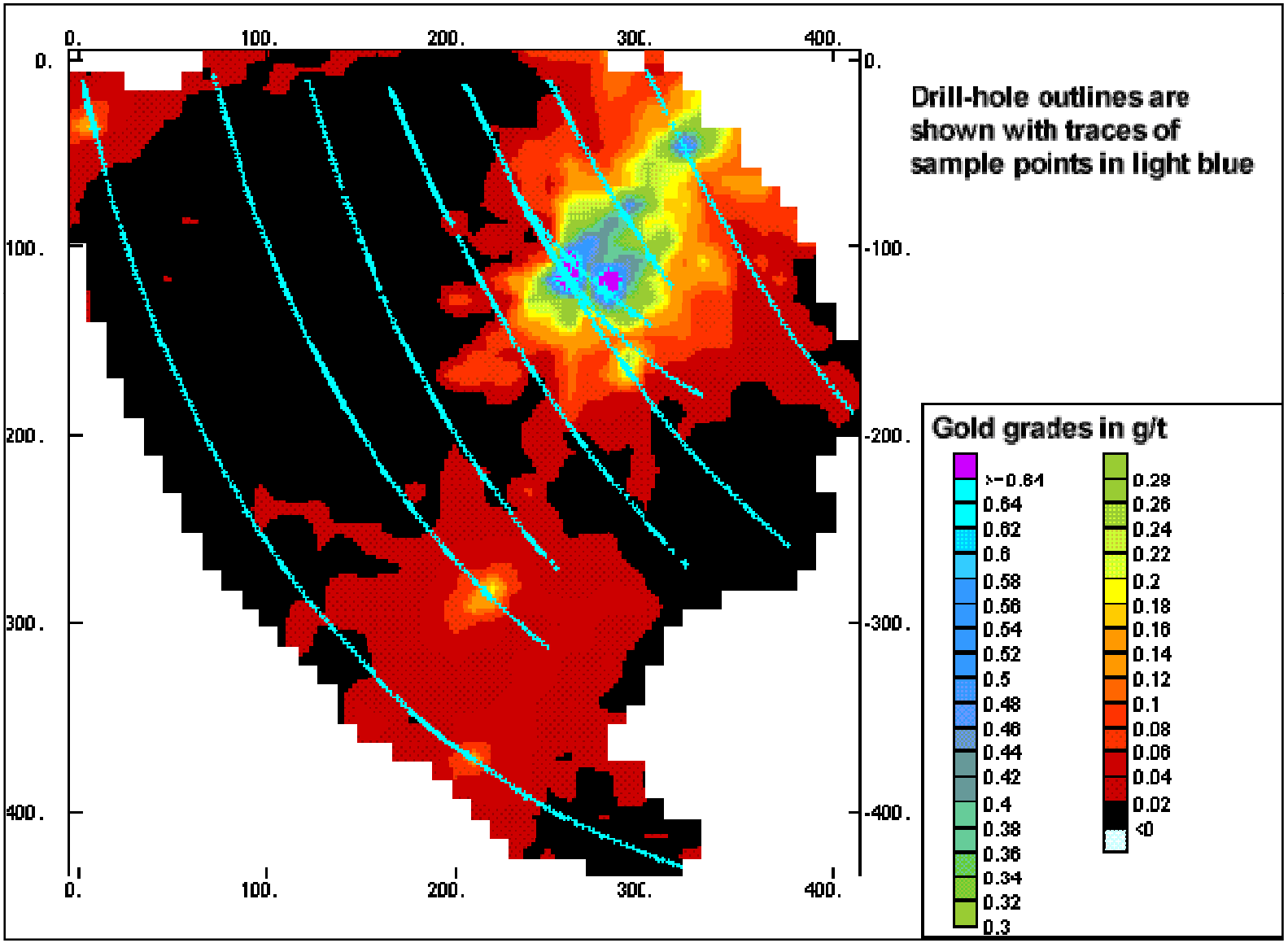
- واریانس هر توزیع در واقع معیاری از پراکندگی حول میانگین آنها است.
- انحراف معیار جذر واریانس داده‌ها است.
- به نسبت انحراف معیار به میانگین داده‌ها ضریب تغییرات CV گویند.

مختصری درباره زمین‌آمار

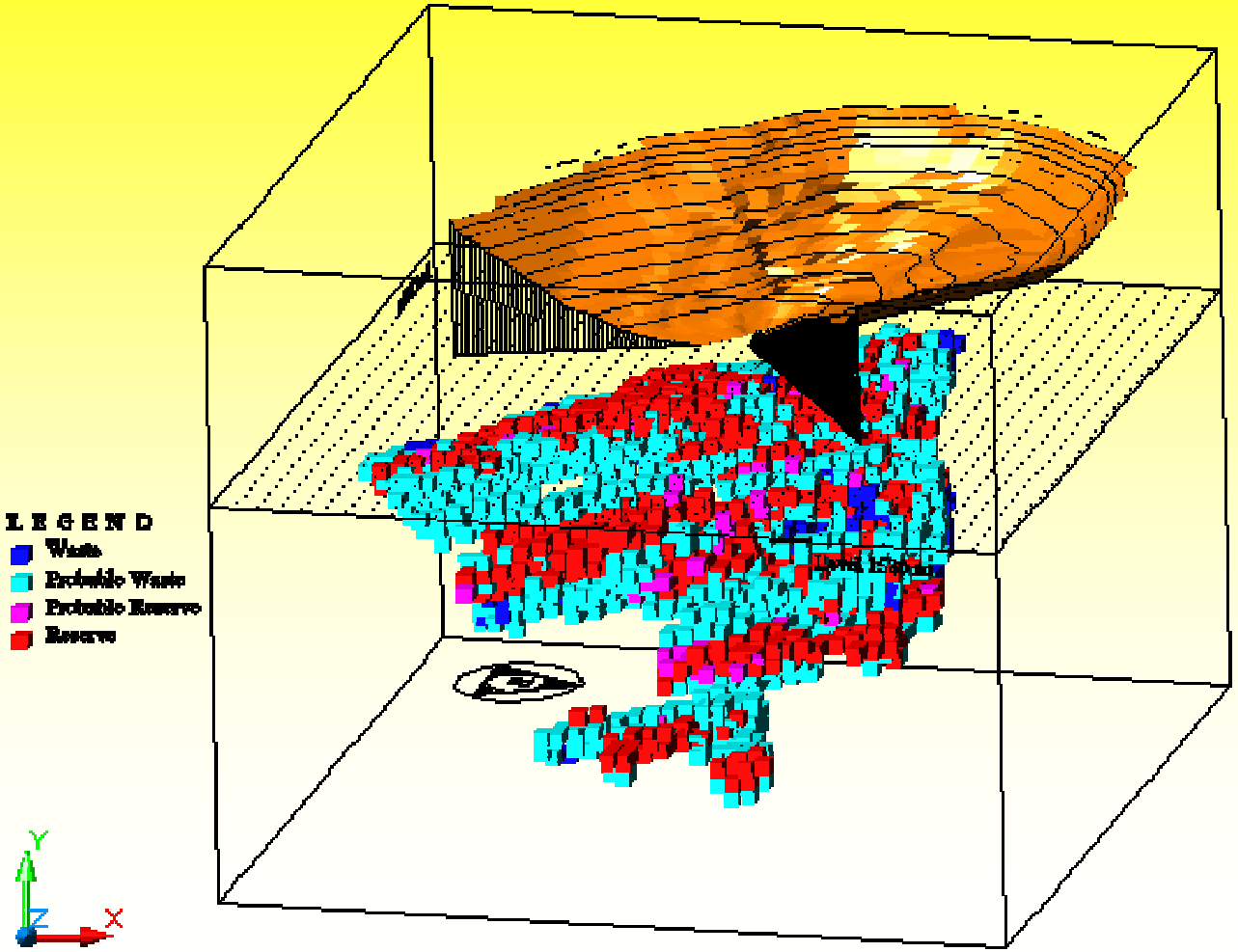
- در زمین‌آمار توزیع فضایی داده‌ها و همچنین تاثیر آنها بریکدیگر بدست‌می‌آید. ابزار موردنظر در اینکار واریوگرام یا پراش‌نما است.
- با کمک واریوگرام می‌توان دامنه تاثیر داده‌ها بر یکدیگر و اثر قطعه‌ای که مبین میزان خطا موجود است را در جهت‌های گوناگون محاسبه‌نمود.
- در اینجا بحث بیضوی ناهمسانگردی مطرح می‌شود که باید در چه جهت‌هایی واریوگرافی انجام داد.
- نتایج بدست‌آمده از واریوگرافی در روش کریگینگ برای محاسبات عیار و دیگر پارامترها به‌کارمی‌رود.


تصویری از یک واریوگرام ترسیمی با نرم‌افزار
Isatis
D1
D2
Variogram Fitting
Experimental Variograms: 2 directions
D1 - Az=130.00, Ay= 0.00, Ax= 0.00
Angular tolerance = 90.00
Lag = 4m, Tolerance = 50.00%, Count = 20
Horizontal Slicing = 15m
D2 - Az=-120.00, Ay= 0.00, Ax= 0.00
Angular tolerance = 90.00
Lag = 15m, Tolerance = 50.00%, Count = 10
Model: 3 basic structures
Global rotation = (Az=170.00, Ay= 0.00, Ax= 0.00)
S1 - Nugget effect
Sill = 0.4000
S2 - Spherical - Range = 11m
Anisotropy coefficients = (1.000,0.733,1.000)
Sill = 0.3500
S3 - Spherical - Range = 40m
Anisotropy coefficients = (1.000,0.400,1.000)
Sill = 0.2500
0.
25.
50.
75.
100.
125.
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00

نتایج یک ارزیابی زمین‌آماری با نرم‌افزار Isatis



یک مدل عیاری ترسیمی در نرم‌افزار Surpac



روش مجذور عکس فاصله

- این نخستین روشی بود که بر اساس تاثیر نمونه‌ها بر یکدیگر ارایه شد. در این روش امکان تاثیر عیار تمام نقاط همسایه در برآورد عیار یک نقطه فراهم می آید. پارامتر اصلی در این امر فاصله نقاط نمونه‌برداری از یکدیگر است.
- بر اساس این روش تاثیر عیارهای اطراف به نسبت مجذور عکس فاصله از مرکز بلوک تا آن عیارها تغییر می کند. بر اساس فرمول g عیار مورد محاسبه، g_i عیار معلوم در فاصله d_i از نقطه مورد محاسبه می‌باشد.

$$g = \frac{\sum (g_i / d_i^2)}{\sum d_i^{-2}}$$

نقشه ژیوشیمیایی بدست‌آمده با استفاده از روش مجذور عکس‌فاصله روش مجذور عکس فاصله