تعیین ابعاد بهینه انباشتگاه‌های اختلاط با استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماری– مطالعه موردی

ثریا فروغی [۱]، مسعود منجزی [۲]* و محمدرضا خالصی [۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۲] دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۳] استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۶/ ۰۱/ ۱۳۹۳ تاریخ پذیرش: ۰۴/ ۰۵/ ۱۳۹۴

چکیده

نوسان‌های عیاری خوراک کارخانه یکی از عوامل مهم در بازیابی کارخانه فرآوری است. به‌صورتی که هر چه این نوسان‌ها کمتر باشد، بازدهی کارخانه افزایش می‌یابد. به منظور کاهش تغییرپذیری عیاری، انباشتگاه‌های همگن‌سازی در صنعت معدنکاری به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. جرم و تعداد لایه‌های سازنده انباشتگاه نقش بسزایی در میزان کاهش تغییرپذیری عیاری دارند. با افزایش جرم و تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده انباشتگاه، تغییرپذیری عیاری کاهش می‌یابد. هر چند این افزایش می‌تواند سبب افزایش پیچیدگی و هزینه‌های عملیاتی شود. در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی تغییرپذیری عیاری در معدن انگوران از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری استفاده شده است. در این راستا، ابتدا با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی، ۲۵ تحقق هم‌احتمال عیاری با استفاده از نرم‌افزار SGeMS تولید و پس از آن مدل بلوکی مربوط به هر تحقق در نرم‌افزار DATAMINE ساخته می‌شود. در مرحله بعد، با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی تولید حاصل از نرم‌افزار NPV، بلوک‌های ارسالی به پایل مشخص می‌شوند. در پایان، تغییرپذیری عیاری برای ابعاد مختلف انباشتگاه و تعداد لایه‌های سازنده انباشتگاه تعیین شد. بر پایه نتایج به دست آمده، انباشتگاه با جرم ۱۸۷ کیلو تن متشکل از ۲۵ لایه دارای کمترین تغییرپذیری است.

کلیدواژه‌ها: تغییرپذیری عیاری، انباشتگاه همگن‌سازی، شبیه‌سازی زمین‌آماری.

***نویسنده مسئول:** مسعود منجزی
E-mail: monjezi@modares.ac.ir

۱– پیش‌نوشتار

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای بهبود کیفیت مواد خام و عملکرد کارخانه فرآوری انجام شده است. عوامل زیادی در بازیابی کارخانه فرآوری نقش دارند که یکی از مهم‌ترین آنها، نوسان‌های عیاری خوراک کارخانه است. هر چه نوسان‌های عیاری خوراک کارخانه در بازه‌های کوچک‌تری باشد، کنترل مواد ورودی و عملکرد کارخانه بهتر خواهد بود. تغییرات عیاری را می‌توان از روش‌هایی مانند زمان‌بندی مناسب معدنکاری، یافتن ثابت‌ترین مسیر معدنکاری ممکن و یا همگن‌سازی مواد معدنی با استفاده از انباشتگاه‌های اختلاط کاهش داد که از میان این راهکارها، انباشتگاه‌های همگن‌سازی در صنعت معدنکاری، به‌طور گسترده‌ای برای کاهش نوسان‌های عیاری خوراک کارخانه استفاده می‌شوند.

برای بررسی تغییر پذیری عیاری در نخستین گام باید اطلاعات زمین‌شناسی و کانی‌شناختی به‌طور کامل جمع‌آوری شوند (Parker, 1979). رایج‌ترین روش‌های زمین‌آماری برای تعیین تغییرپذیری عیاری، روش‌های برآورد به‌ویژه کریجینگ بوده است که این روش‌ها از بررسی عدم قطعیت عیاری مربوط به برآورد و پیش‌بینی صحیح نوسان‌های عیاری عاجز هستند (Matheron, 1963). برای رفع این مشکل، امروزه روش‌های شبیه‌سازی زمین آماری گسترش یافته‌اند که با تولید تحقق‌های هم‌احتمال می‌توانند نوسان‌های عیاری و عدم قطعیت عیاری مربوط به برآورد را به دست آورند.

از این میان، روش‌های شبیه‌سازی شرطی به‌دلیل بازتولید ویژگی‌های پراکندگی و پیوستگی فضایی داده‌های اولیه بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Beretta et al., 2010). هنگامی که پیوستگی فضایی و تغییرپذیری در کانسار به‌طور مناسب تعیین شد، می‌توان سطح اعتماد را در مدل شبیه‌سازی شده محاسبه کرد که این می‌تواند به برآورد ریسک در فرایندهای تصمیم‌گیری کمک کند (Ribeiro et al., 2008).

جرم انباشتگاه‌ها و تعداد لایه‌های سازنده آن، فاکتورهای مهمی هستند که در کارایی اختلاط مؤثر هستند (Beretta et al., 2010). انباشتگاه‌های بزرگ‌تر در کاهش تغییرپذیری مؤثرترند ولی از دید عملیاتی به‌دلیل افزایش اندازه تجهیزات و هزینه‌ها با مشکلاتی روبرو هستند. اندازه بهینه انباشتگاه، کمترین ابعادی است که ماده معدنی را با تغییرپذیری عیاری قابل قبول به کارخانه تحویل می‌دهد. از جمله مطالعاتی که در زمینه طراحی انباشتگاه‌ها با استفاده از ابزار زمین‌آماری انجام شده است، می‌توان به مطالعات Costa et al. (2007)، Abichequer et al. (2009)، Marques et al. (2009) و Abichequer et al. (2011) اشاره کرد. به تازگی Marques & Costa (2013) از ترکیب روش شبیه‌سازی زمین‌آماری و توالی معدنکاری استفاده کرده‌اند. در پژوهش حاضر از ترکیب شبیه‌سازی زمین‌آماری و توالی معدنکاری برای طراحی انباشتگاه‌های معدن انگوران استفاده شده است که با این روش می‌توان تغییرپذیری را در انباشتگاه‌های اختلاط بدون نیاز به نمونه‌برداری از آنها بررسی کرد.

۲– روش پژوهش

برای طراحی انباشتگاه‌های اختلاط ابتدا باید عیارهای مواد تشکیل‌دهنده انباشتگاه مشخص شود که برای این کار ابتدا مدل‌های بلوکی عیاری کانسار با استفاده از روش‌های زمین‌آماری به دست می‌آید.

۲– ۱. تولید مدل‌های عیاری سه‌بعدی هم‌احتمال با استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماری برای کانسار

شبیه‌سازی زمین آماری در سال ۱۹۷۰ توسط ژورنل (Journel) مطرح شد و از آن پس در صنایع مختلفی چون معدن، محیط زیست، نفت و گاز به طور گسترده‌ای به منظور ارزیابی ریسک و عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفت. از میان این روش‌ها، روش شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) به‌عنوان یکی از روش‌های معمول و انعطاف‌پذیری است که امروزه بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنچه که در روش‌های گوسی به عنوان اصل اولیه شناخته شده است، نرمال بودن داده‌های اولیه است. به‌طور کلی، الگوریتم اصلی انجام شبیه سازی گوسی به‌صورت زیر است:

- خوشه‌بندی سلولی
- تبدیل به نرمال استاندارد

Archive of SID
www.SID.ir

• واریوگرافی برای داده‌های نرمال
• تحقق‌های شبیه‌سازی گوسی متناوب
• تبدیل وارون داده‌های شبیه‌سازی نرمال به فضای داده‌های اولیه
• اعتبارسنجی نتایج
• بررسی مقادیر شبیه‌سازی شده (Tajvidi et al., 2013)

۲- ۲. بررسی تغییرپذیری در انباشتگاه‌ها

در برنامه‌ریزی تولید با استفاده از مدل‌های بلوکی هم احتمال ساخته شده، ترتیب استخراج هر بلوک و بلوک‌های سازنده هر انباشتگاه مشخص می‌شود. مراحل کار بررسی تغییرپذیری در انباشتگاه‌ها شامل موارد زیر است:

• تولید مدل‌های عیاری هم‌احتمال چندگانه با استفاده از شبیه‌سازی گوسی متوالی
• تعیین توالی استخراج مدل بلوکی عیاری شبیه‌سازی شده با توجه به زمان‌بندی معدن
• محاسبه تغییرپذیری میان انباشتگاهی برای ابعاد معین انباشتگاه در هر مدل بلوکی عیاری
• محاسبه تغییرپذیری در برداشت از هر انباشتگاه ساخته شده (واریانس عیارهای هر تکه برداشت شده)

رایج‌ترین نوع انباشتگاه چورن (Chevron) با ساختار طولی است که در شکل ۱ مدل تقریبی آن نشان داده شده است. در این تحلیل ملاحظات و فرضیات زیر استفاده شده است:

• مدل بر پایه ساختار به کار رفته در انباشتگاه‌های طولی است.
• هندسه نیم‌مخروط‌های موجود در لبه‌های انباشتگاه مدنظر قرار نمی‌گیرد.
• انباشت مواد در هر دو سوی حرکت انباشت‌کننده انجام می‌شود.
• سرعت انباشت و برداشت مواد ثابت است، در حالی که تجهیزات حرکت می‌کنند.
• مواد، عمود بر محور اصلی انباشتگاه برداشت می‌شوند.
• برش‌های برداشتی در هر عبور یک متر ستبرا دارند.
• تفکیک مواد در انباشتگاه نادیده گرفته می‌شود.
• ذرات در بلوک‌های معدنکاری شده، در مقایسه با جرم انباشتگاه بی‌نهایت کوچک هستند (Marques & Costa, 2013).

اطلاعات مورد نیاز در طراحی انباشتگاه شامل مدل بلوکی و ترتیب معدنکاری است و نیز داده‌های ورودی باید دربرگیرنده جرم و حجم هر بلوک برای محاسبات مورد نیاز باشند. اطلاعات مربوط به مختصات هر بلوک اختیاری است ولی در صورت داشتن این اطلاعات، امکان مشخص کردن موقعیت فضایی بلوک‌های مشکل‌ساز در فرآوری، فراهم می‌شود.

۲- ۳. محاسبه تغییرپذیری میان انباشتگاه‌ها با جرم‌های مختلف (تغییرات میان انباشتگاهی؛ inter- pile grade variability)

از آنجایی که عیار بلوک‌های معدنکاری شده با یکدیگر و نیز با میانگین عیاری سالانه تولید متفاوت است، می‌توان با ترکیب چند بلوک و تشکیل انباشتگاه، عیار میانگین انباشتگاه را به عیار میانگین سالانه نزدیک کرد. این کاهش تغییرپذیری در انباشتگاه‌ها بر پایه اصول رابطه واریانس- حجم استوار است. یعنی هر چه اندازه پایه بزرگ‌تر باشد تغییرپذیری کمتر خواهد بود. متغیرهایی که برای محاسبه تغییرپذیری عیاری میان انباشتگاه در نظر گرفته می‌شود عبارتند از:

- **جرم اولیه:** کوچک‌ترین اندازه انباشتگاه همگن‌سازی است که مقدار در نظر گرفته شده باید از کوچک‌ترین جرم (برای نمونه یک بلوک) در داده‌های ورودی بزرگ‌تر باشد.
- **افزایش جرم:** نشانگر تفاوت میان اندازه‌های انباشتگاه بررسی شده است. مقدار این متغیر باید از کوچک‌ترین جرم در فایل ورودی بزرگ‌تر و از مجموع جرم همه بلوک‌های موجود در داده‌های ورودی کمتر باشد.
- **جرم نهایی:** بزرگ‌ترین جرم انباشتگاه که بررسی می‌شود. مقدار در نظر گرفته شده باید از مجموع جرم همه بلوک‌های موجود در داده‌های ورودی کمتر باشد (Marques & Costa, 2013).

مرحله اول در تعیین تغییرپذیری میان‌انباشتگاهی، محاسبه کاهش تغییرپذیری است. برای این منظور، ابتدا میانگین وزن‌دار برای هر شبیه‌سازی زمین‌آماری به دست می‌آید:

$$T_{sim} = \frac{1}{M_t} \sum_1^n (T_l \times M_l) \quad (۱$$

که در آن عیار T_{sim} میانگین یک شبیه‌سازی زمین‌آماری، M_t مجموع جرم‌های همه بلوک‌ها در مجموعه داده‌های ورودی (کیلو تن)، n تعداد بلوک‌های موجود در شبیه‌سازی زمین‌آماری و T_l و M_l به‌ترتیب عیار بلوک و جرم بلوک l هستند.

مرحله بعد محاسبه عیار میانگین وزنی هر انباشتگاه برای شبیه‌سازی مربوطه است:

$$T_p = \frac{1}{M_p} \sum_1^n (T_l \times M_l) \quad (۲$$

که در آن، T_p میانگین عیاری انباشتگاه، M_p جرم کلی انباشتگاه (کیلو تن)، n تعداد بلوک‌های تشکیل‌دهنده انباشتگاه و T_l و M_l به ترتیب عیار بلوک و جرم بلوک l هستند.

در پایان، مجذور تفاضل میان عیار انباشتگاه و عیار میانگین هر شبیه‌سازی (T_{sim})، برای هر انباشتگاه به دست می‌آید. همه مجذور تفاضل‌ها برای هر انباشتگاه محاسبه و سپس میانگین‌گیری می‌شود. مقدار به دست آمده، واریانس عیارهای انباشتگاه برای جرم مورد نظر است. فرایند بالا برای شبیه‌سازی‌های دیگر تکرار می‌شود.

۲- ۴. استفاده از واریانس میان انباشتگاه به منظور طراحی معدنکاری

یکی از مهم‌ترین مزایای انباشتگاه‌های همگن‌سازی این است که می‌توان از بلوک‌هایی که پیش‌تر به عنوان باطله در نظر گرفته شده بودند، بدون ضرر استفاده کرد. در صورت وجود مختصات مکانی هر بلوک در فایل ورودی داده‌ها، امکان شناسایی فضایی بلوک‌ها در یک انباشتگاه همگن‌سازی فراهم می‌شود. بنابراین در صورتی که محتوای عیاری آنها در خارج از بازه عیاری مطلوب قرار گیرد، می‌توان انباشتگاه‌های یاد شده و نیز بلوک‌های تشکیل‌دهنده آنها را شناسایی کرد که از این اطلاعات می‌توان برای تعیین دوباره توالی معدنکاری به منظور برآورد عیارهای هدف استفاده کرد.

۲- ۵. محاسبه تغییرپذیری داخلی (Intra-pile variability) برای هر انباشتگاه

در انباشتگاه همگن‌سازی، هر لایه به عنوان یک طبقه در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که یک برش کامل با ستبرای یکسان از انباشتگاه برداشت می‌شود، همه لایه‌ها را با نسبت یکسان دربرمی‌گیرد و بنابراین واریانس میان لایه‌ها از واریانس میانگین پشته حذف می‌شود. در مرحله اول بلوک‌های سازنده انباشتگاه همگن مشخص و در پایان میانگین وزنی محتوای آن با استفاده از معادله ۲ به دست می‌آید. در مرحله دوم، حجم هرانباشتگاه بر طبق جرم در نظر گرفته شده، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_p = \sum_1^n V_l \times F_e \quad (۳$$

که در آن V_p حجم کل انباشتگاه همگن (متر مکعب)، V_l حجم هر بلوک در انباشتگاه همگن (متر مکعب)، Fe فاکتور حجم و n تعداد بلوک‌های هر انباشتگاه هستند.

وقتی حجم هر بلوک به صورت برجا معین شد، با استفاده از فاکتور حجم به حجم پس از معدنکاری تبدیل می‌شود. در طراحی انباشتگاه فرض شده که انباشت‌کننده با سرعت ثابت حرکت می‌کند و جریان تخلیه در یک گذر کامل وقتی لایه شکل می‌گیرد، ثابت می‌ماند. با دانستن حجم مواد به کار رفته در انباشتگاه و تعداد لایه‌ها، حجم مواد هر لایه و بلوک‌های سازنده آن به دست می‌آید و در پایان، تغییرپذیری

Archive of SID
www.SID.ir

عیاری برای تعداد لایه‌های معین حاصل می‌شود. سازمان‌دهی بلوک‌های معدنکاری شده در انباشتگاه در لایه‌های مختلف موجب کاهش تغییرپذیری عیاری در مواد برداشت شده می‌شود. از آنجا که با افزایش شمار لایه‌ها در انباشتگاه، هر برش قائم از مواد مشابه شکل می‌گیرد و همبستگی در کیفیت مواد افزایش می‌یابد، تغییرپذیری مواد برداشت شده کاهش می‌یابد.

۳- مطالعه موردی

معدن سرب و روی انگوران در شهرستان ماه‌نشان و در ۱۳۵ کیلومتری جنوب باختری شهر زنجان و در موقعیت ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه خاوری قرار گرفته است. طبق آخرین برآوردهای صورت گرفته ذخیره باقیمانده در حدود ۱۲ میلیون تن سرب و روی با متوسط عیار ۲۵ تا ۳۰ درصد روی و ۳ تا ۶ درصد سرب است. داده‌های مورد مطالعه شامل داده‌های اکتشافی حاصل از ۴۵ گمانه اکتشافی و ۴۶۲ نمونه است. متغیرهای آماری مربوط به دو عنصر سرب و روی در این معدن در جدول ۱ آمده است.

محوطه انباشت مواد در معدن انگوران، دارای مساحت ۱۸ هزار متر مربع و ظرفیت ۲۰۰ کیلو تن، به‌صورت دو بانده است. برای انباشت مواد و برداشت آنها از انباشتگاه، از دستگاه هویت رابینز با ظرفیت ۱۴۰ تن در ساعت استفاده می‌شود. طول هر باند انباشت ۳۶۰ متر، عرض آن ۳۰ متر و ارتفاع آن ۹ تا ۹/۵ متر است. ظرفیت ذخیره برای مواد پرعیار ۹۰ هزار تن و برای مواد کم عیار ۷۰ هزار تن است.

۴- شبیه‌سازی SGS

با استفاده از نرم‌افزار SGeMS و به روش SGS، ۲۵ تحقق هم‌احتمال عیاری برای سرب و روی در بلوک‌های ۱۰*۱۰*۱۰ تولید شده است. از آنجا که همبستگی ضعیفی میان این دو عنصر وجود دارد، به‌طور جداگانه شبیه‌سازی شده‌اند. متغیرهای مربوط به واریوگرافی در جدول‌های ۲ و ۳ و مدل‌های واریوگرام برازش شده برای هر کدام در شکل ۲ آورده شده است. چند تحقق حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای هر یک از دو عنصر سرب و روی در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود.

۵- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها

مدل‌های عیاری شبیه‌سازی شده باید پیش از استفاده در ساخت انباشتگاه، اعتبارسنجی شوند که شامل بررسی چشمی بازتولید همبستگی فضایی و داده‌های شرطی، هیستوگرام و واریوگرام است. نتایج اعتبارسنجی توزیع فراوانی سرب و روی در شکل‌های ۵ و ۶ و اعتبارسنجی واریوگرام‌ها در شکل ۷ آورده شده است.

۶- عدم قطعیت عیاری بلوک‌ها

با داشتن تحقق‌های هم‌احتمال عیاری حاصل از شبیه‌سازی‌ها، عیارهای هر بلوک معدنکاری شده در یک سال مشخص شده که اختلاف میان بیشترین و کمترین عیار هر بلوک، مرز عدم قطعیت حاصل از عیارهای شبیه‌سازی مربوط به آن را به دست می‌دهد. مثلث‌های سبز رنگ نشانگر میانگین عیاری هر بلوک است (شکل ۸).

۷- تغییرپذیری میان‌انباشتگاهی

برای بررسی تأثیر اندازه انباشتگاه بر تغییرپذیری عیاری، طبق آنچه در بخش ۲-۳ مطرح شد؛ واریانس عیاری برای جرم‌های مختلف انباشتگاه محاسبه و نمودار انحراف معیار انباشتگاه از میانگین سالانه برای جرم‌های یاد شده رسم می‌شود. برای بررسی چگونگی کاهش تغییرپذیری در انباشتگاه‌های همگن‌سازی، یک فرایند شبیه‌سازی با متغیرهای زیر تعیین شده است:

- جرم انباشتگاه اولیه ۳۴ کیلو تن
- جرم انباشتگاه نهایی ۲۷۲ کیلو تن
- افزایش جرم میان انباشتگاه‌های آزمایش شده ۱۷ کیلو تن

شکل ۹ کاهش تغییرپذیری عیاری را با افزایش اندازه انباشتگاه نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود، با افزایش اندازه انباشتگاه، تغییرپذیری به‌صورت تابع نمایی از جرم کاهش می‌یابد که اصل رابطه واریانس- حجم را اثبات می‌کند. نتایج به دست آمده، شبیه به آنچه Costa et al. (2007) و Marques & Costa (2013) نشان داده‌اند، می‌باشد.

با افزایش ابعاد انباشتگاه تا جرم ۱۸۷ کیلوتن تغییرپذیری عیاری کاهش می‌یابد؛ ولی پس از جرم ۱۸۷ کیلوتن کاهش چشم‌گیری در تغییرپذیری دیده نمی‌شود. از این رو جرم ۱۸۷ کیلو تن به عنوان مناسب‌ترین جرم انتخاب می‌شود. چرا که در جرم‌های بزرگ‌تر از آن هزینه‌ها (هزینه‌های عملیاتی، محوطه بزرگ‌تر، ماشین آلات بیشتر و بزرگ‌تر) افزایش می‌یابد بدون اینکه انحراف معیار کاهش چشمگیری داشته باشد. در جدول‌های ۴ و ۵ بیشترین و کمترین کاهش تغییرپذیری در انباشتگاه‌ها آورده شده است.

۸- مشخص کردن انباشتگاه‌های بحرانی

انباشتگاه‌های ۱۸۷کیلوتنی ساخته می‌شود که هر انباشتگاه ۲۵ عیار دارد که از مدل‌های هم‌احتمال شبیه‌سازی‌ها حاصل می‌شود. بیشترین و کمترین عیار حاصل از شبیه‌سازی برای هر انباشتگاه مشخص و بازه عدم قطعیت عیاری برای هر انباشتگاه تعیین و رسم می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، با تشکیل انباشتگاه‌های ۱۸۷ کیلو تن، بازه عدم قطعیت عیاری در مقایسه با تغییرپذیری بلوک‌های استخراجی کاهش چشمگیری دارد. برای عنصر روی، بازه عدم قطعیت از ۰/۶۹ تا ۴۵/۳۶ به ۱۵/۹۴ تا ۳۵/۶۵ و در مورد عنصر سرب از ۰/۰۵ تا ۲۱/۶ به ۱ تا ۷/۷۴ کاهش یافت.

با بررسی تغییرپذیری مربوط به انباشتگاه، می‌توان دید که مقادیر تغییرپذیری عیاری نسبت به مرحله پیش کمتر شده است. در صورت مشخص بودن بازه عیاری مورد نیاز برای کارخانه (۲۰ تا ۳۵ درصد برای روی و ۳ تا ۶ درصد برای سرب)، اگر مرز عدم قطعیت کاملاً خارج از محدوده مجاز یاد شده باشد، نشان می‌دهد که مواد معدنی این انباشتگاه‌ها بدون ضرر مالی نمی‌توانند فرآوری شوند. در انباشتگاهی که از حدود مجاز تخطی کرده باشد، می‌توان بلوک‌های با عیار نامناسب را در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت حذف کرد تا انباشتگاه به حدود مجاز برسد، بدین ترتیب تعداد بلوک‌های از دست رفته کمتر خواهد بود. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان دید هیچ انباشتگاهی به‌طور کامل از حدود مجاز تخطی نکرده و عیار میانگین آنها در درون بازه قابل قبول کارخانه قرار گرفته است.

۹- تغییرپذیری درون‌انباشتگاهی

برای بررسی تغییرپذیری درونی عیارها در انباشتگاه، فرایند برای تعداد مختلف لایه‌ها با در نظر گرفتن متغیرهای زیر انجام می‌شود:

- جرم کل انباشتگاه همگن‌سازی ۱۸۷ کیلو تن
- حجم مواد تخلیه شده با انباشت‌کننده در مسیر آن ۴/۵ مترمکعب در هر متر (سرعت ثابت)
- فاکتور حجمی مواد ۱/۳
- زاویه قرار مواد ۳۵ درجه
- تعداد لایه‌های اولیه ۱
- مراحل افزایش تعداد لایه‌ها ۵
- تعداد لایه‌های نهایی ۵۰

Archive of SID

www.SID.ir

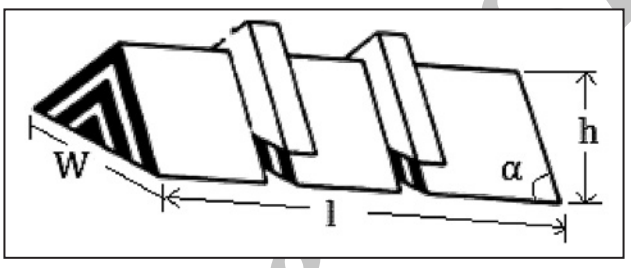
از آنجا که شکل گیری یک انباشتگاه ۲۰۰ کیلو تنی در محل مطالعه چندین روز طول می کشد، موجب محدودیت در تعداد لایه‌ها می‌شود.

همان‌گونه که از شکل ۱۱ مشخص است، با افزایش تعداد لایه‌ها تا ۲۵ لایه تغییرپذیری کاهش می‌یابد. ولی از این تعداد به بعد، کاهش تغییرپذیری بسیار ناچیز است. بنابراین ۲۵ لایه برای تشکیل انباشتگاه ۱۸۷کیلو تن مناسب‌ترین است.

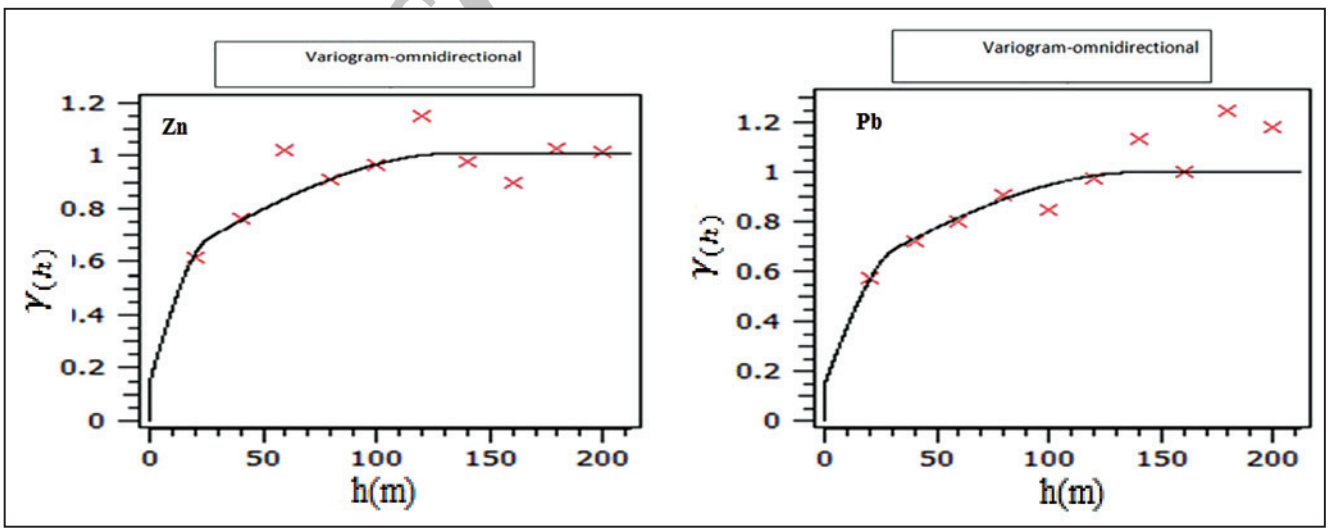
با توجه به حجم مواد تخلیه شده با انباشت کننده در مسیر آن و حجم مواد هر لایه می‌توان طول انباشتگاه را به دست آورد و با داشتن حجم انباشتگاه و طول آن و زاویه قرار سنگ، می‌توان ارتفاع و عرض انباشتگاه را برای تعداد لایه معین محاسبه کرد. نتایج حاصل در جدول ۶ آورده شده است. برای انباشتگاه با جرم ۱۸۷کیلوتن متشکل از ۲۵ لایه، متوسط طول، ارتفاع و عرض به ترتیب برابر با ۶۳۵/۵۵، ۸/۸۷ و ۲۵/۳۵ متر خواهد بود. بدین ترتیب ابعاد بهینه برای انباشتگاه‌های معدن انگوران به دست می‌آید.

۱۰- نتیجه‌گیری

انباشتگاه‌های همگن‌سازی در صنعت معدنکاری به‌طور وسیعی به منظور کاهش تغییرپذیری عیاری در خوراک کارخانه فرآوری استفاده می‌شوند. جرم و تعداد لایه‌های سازنده انباشتگاه عامل‌های مهمی در بازدهی آن هستند. در این پژوهش طراحی انباشتگاه‌های معدن انگوران با استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماری انجام و مشخص شد که انباشتگاه با جرم ۱۸۷ کیلو تن و تعداد ۲۵ لایه کمترین میزان تغییرپذیری عیاری را در پی دارند. در مقادیر بزرگ‌تر از جرم ۱۸۷ کیلو تن و بیشتر از ۲۵ لایه، کاهش چشمگیری در تغییرپذیری دیده نمی‌شود در حالی که هزینه‌ها به‌دلیل افزایش ابعاد ماشین‌آلات و محوطه، افزایش می‌یابد. بنابراین این ابعاد، اندازه بهینه انباشتگاه‌های معدن انگوران است.

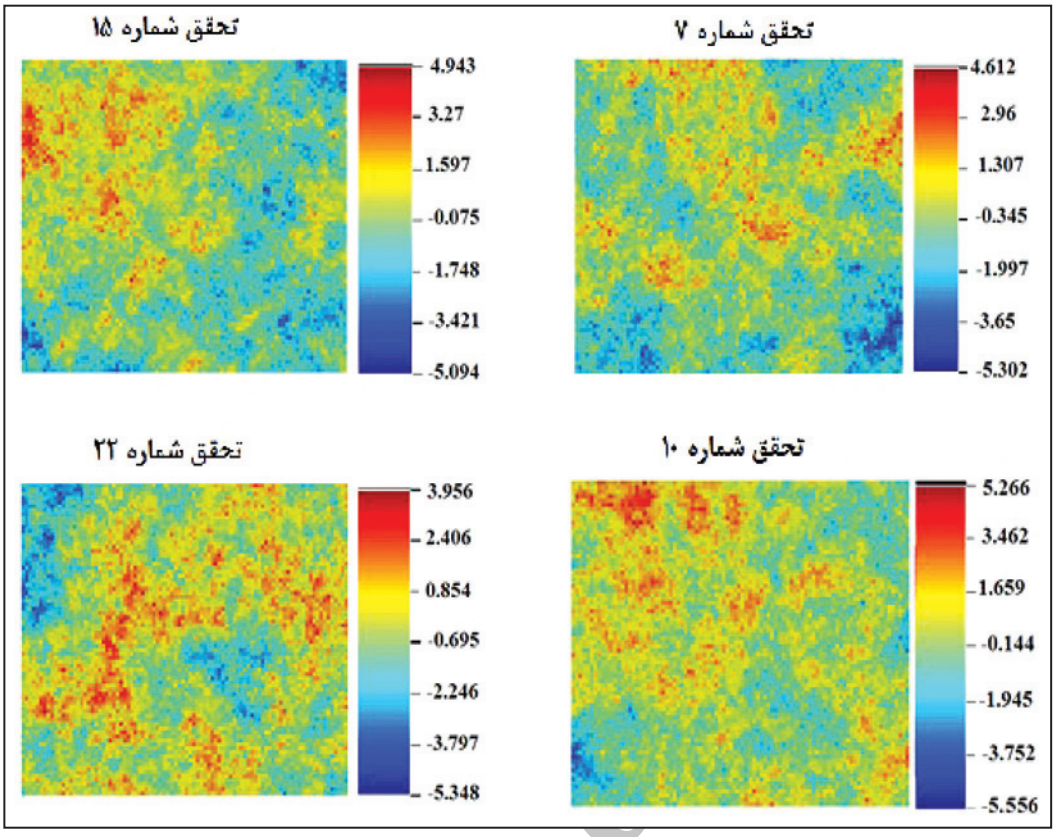


شکل ۱- مدل تقریبی یک انباشتگاه همگن‌سازی (Abichequer et al., 2011).

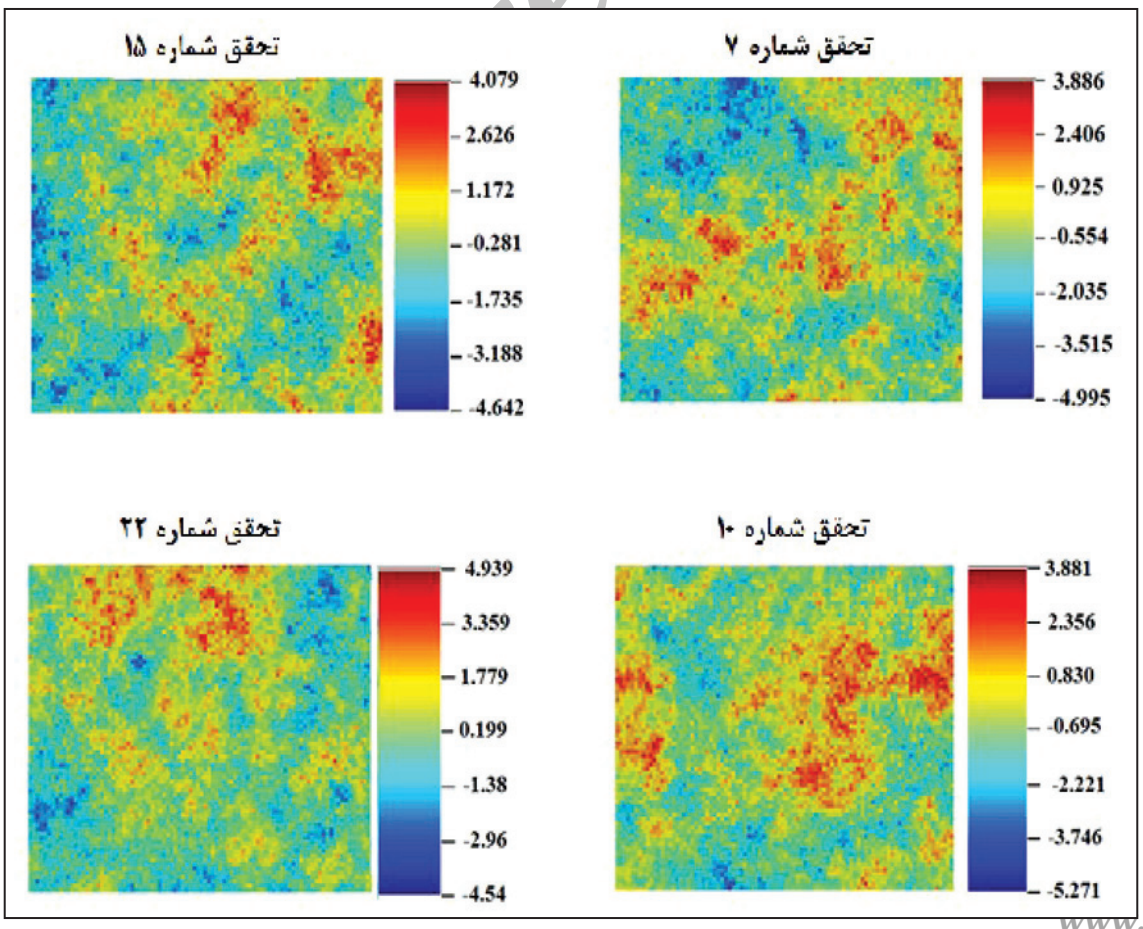


شکل ۲- مدل برازش شده به واریوگرام تجربی روی و سرب.

www.SID.ir

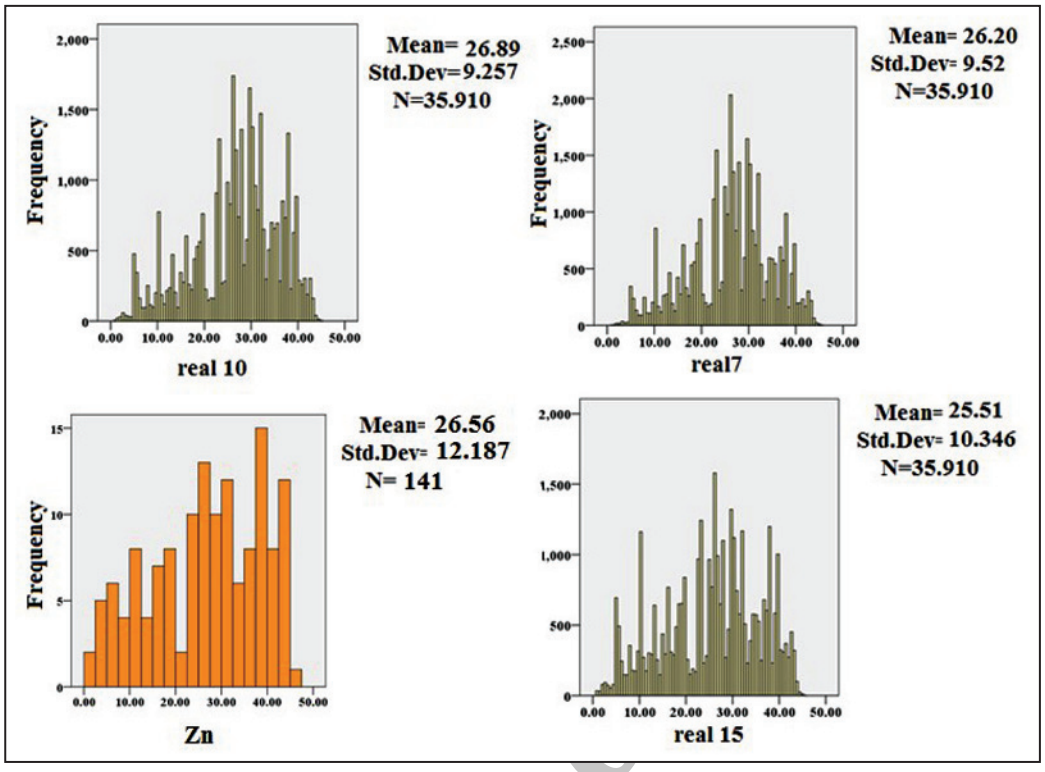


شکل ۳- شبیه‌سازی روی.

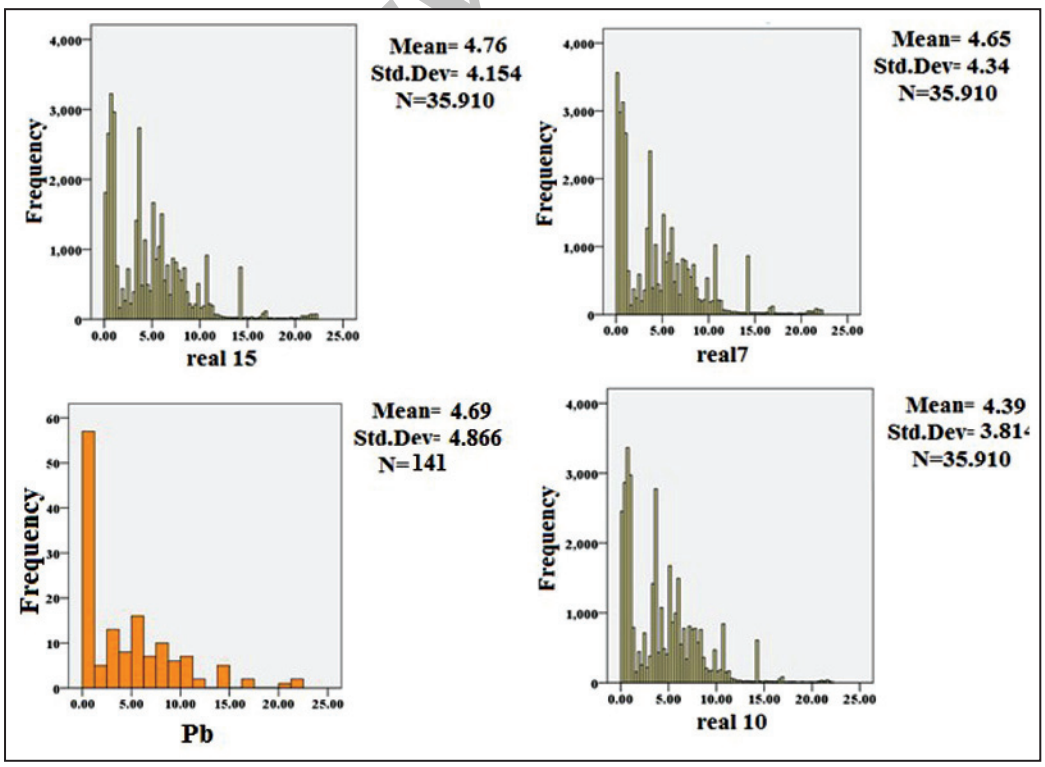


www.SID.ir

شکل ۴- شبیه‌سازی سرب.

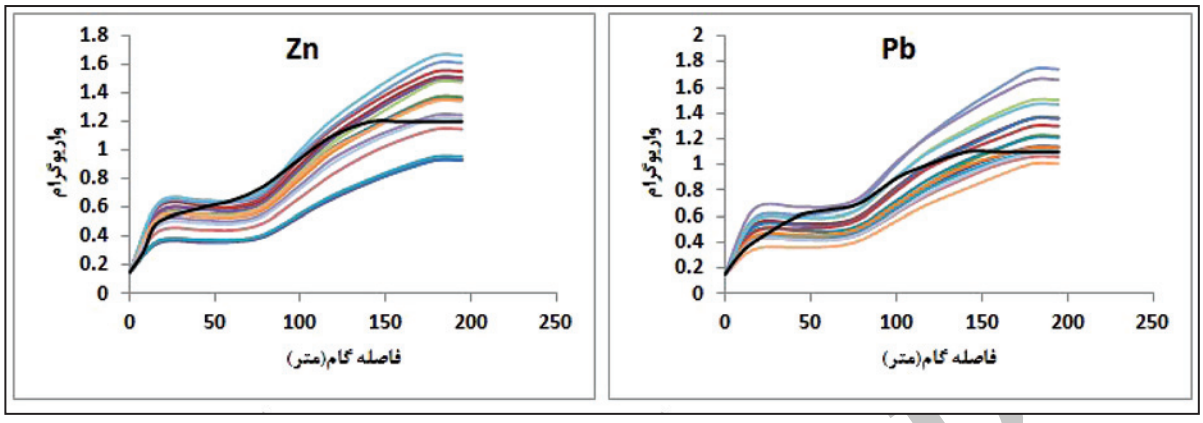


شکل ۵- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های روی با داده‌های اولیه.

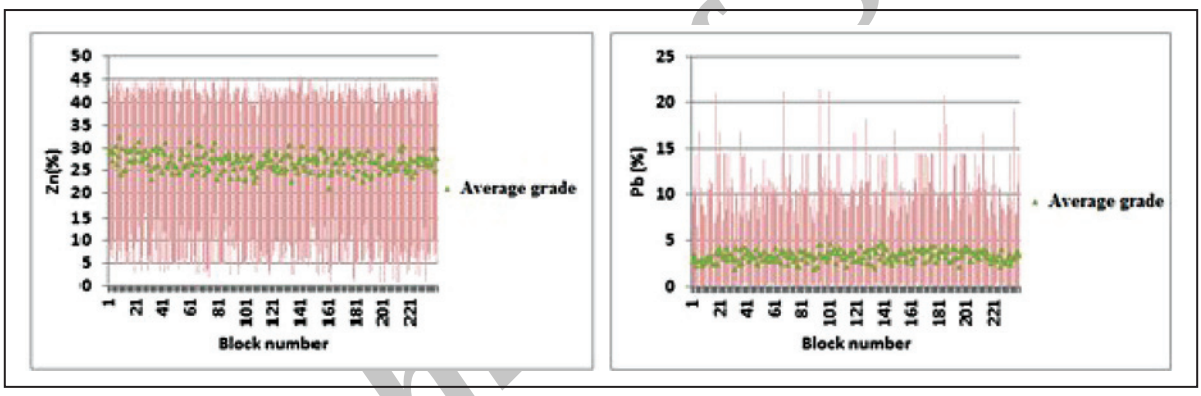


شکل ۶- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های سرب با داده‌های اولیه.

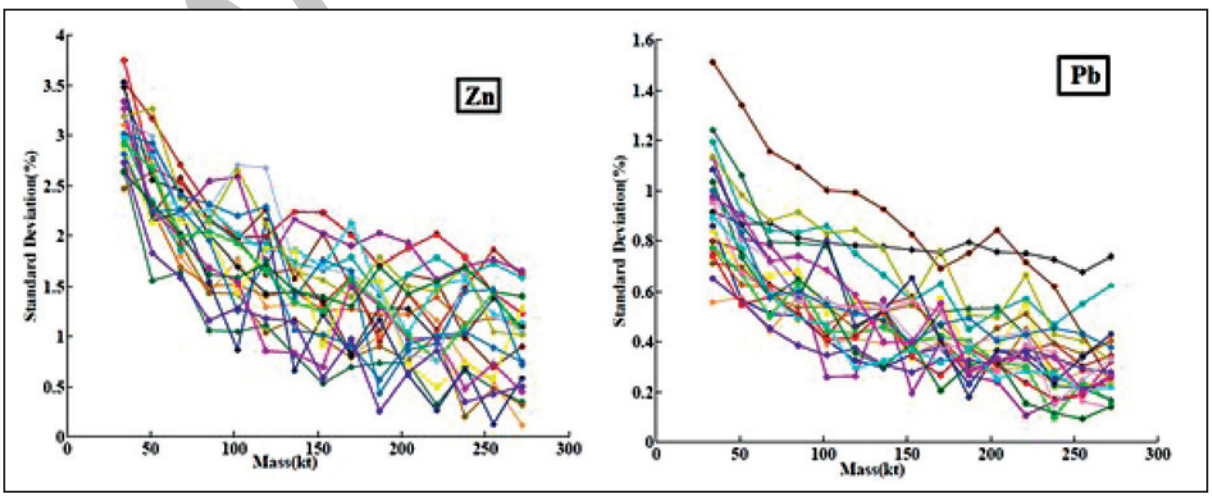
www.SID.ir



شکل ۷- اعتبارسنجی واریوگرام‌های شبیه‌سازی‌ها (منحنی سیاه مربوط به مدل واریوگرام داده های اولیه است).

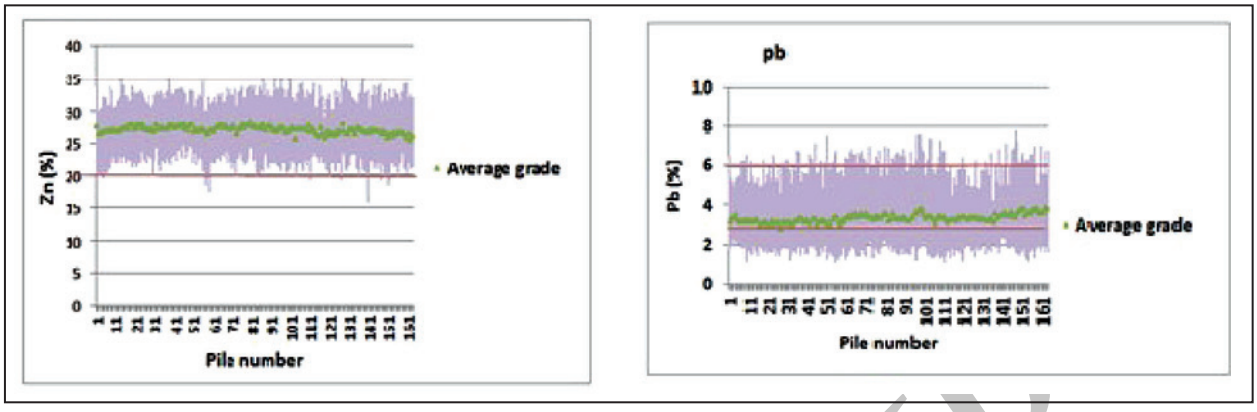


شکل ۸- عدم قطعیت عیاری روی و سرب برای بلوک‌های استخراجی در سال.

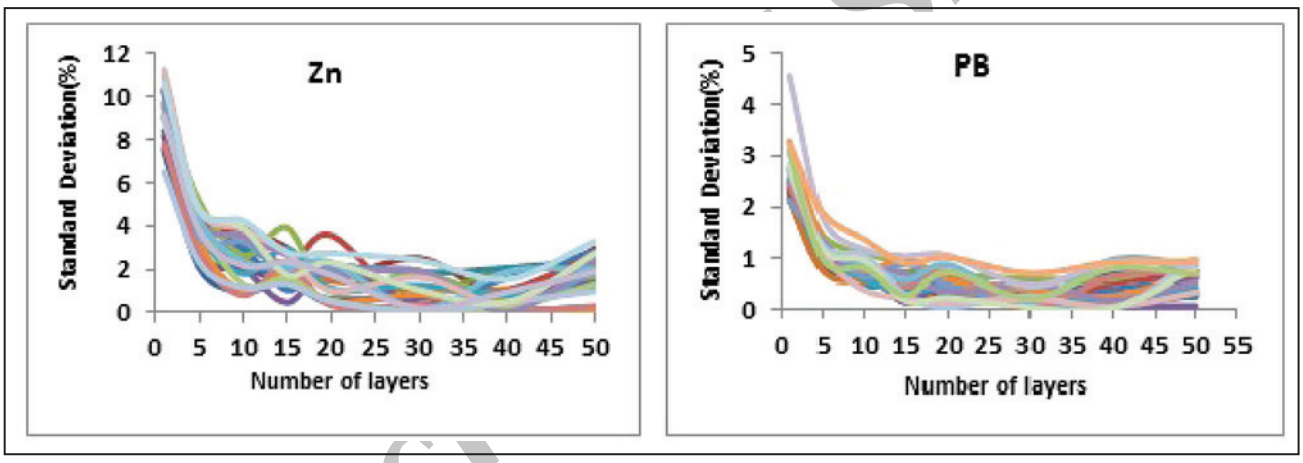


شکل ۹- رابطه میان اندازه انباشتگاه و انحراف معیار انباشتگاه از میانگین سالانه.

www.SID.ir



شکل ۱۰- عدم قطعیت عیاری در انباشتگاه‌های ۱۸۷ کیلو تن.



شکل ۱۱- رابطه میان تعداد لایه‌های انباشتگاه با انحراف از میانگین انباشتگاه.

جدول ۱- متغیرهای آماری متغیر عیار سرب و روی، مربوط به نمونه‌های کامپوزیت شده.

عنصر	تعداد داده‌ها	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	کشیدگی	چولگی
روی	۱۴۴	۲۶/۱۷۵	۱۲/۳۶۱	۰/۶۹	۴۵/۳۶	-۱/۰۲۶	-۰/۳۳۲
سرب	۱۴۴	۵/۳۸۵	۶/۷۹۴	۰/۰۵	۳۹/۲۴	۹/۸۴۹	۲/۷۱

جدول ۲- متغیرهای مورد استفاده در واریوگرافی.

طول گام‌ها (متر)	تلرانس طول گام (متر)	تعداد گام‌ها
۲۰	۱۰	۱۰

www.SID.ir

جدول ۳- متغیرهای حاصل از برازش مدل واریوگرام.

ساختار	متغیر	عنصر	
		روی	سرب
۱	مدل	کروی	کروی
	اثر قطعه‌ای	۰	۰
	سقف	۰/۴۱	۰/۳۹
	شعاع(متر)	۲۶	۳۲
۲	مدل	کروی	کروی
	اثر قطعه‌ای	۰/۱۵	۰/۱۵
	سقف	۱	۱
	شعاع(متر)	۱۳۶	۱۴۰

جدول ۴- کاهش تغییرپذیری عیاری روی برای دو حالت بیشترین و کمترین کاهش تغییرپذیری برای انباشتگاه‌های ۱۸۷ کیلو تن.

شماره تحقق	انحراف معیار داده‌های اولیه	انحراف معیار عیاری انباشتگاه‌ها	کاهش تغییرپذیری (٪)
۲۲	۸/۹۶	۱/۲۵	۸۶/۰۲
۷	۱۰/۲۳	۳/۴	۶۶/۷۷

جدول ۵- کاهش تغییرپذیری عیاری سرب برای دو حالت بیشترین و کمترین کاهش تغییرپذیری برای انباشتگاه‌های ۱۸۷ کیلو تن.

شماره تحقق	انحراف معیار داده‌های اولیه	انحراف معیار عیاری انباشتگاه‌ها	کاهش تغییرپذیری (٪)
۱۸	۴/۱۹	۰/۶۴	۸۴/۶۵
۱۱	۲/۷۳	۰/۹۸	۶۳/۷۸

جدول ۶- ابعاد پایل برای تعداد لایه‌های مختلف سازنده پایل.

عرض پایل (متر)	ارتفاع پایل (متر)	متوسط طول پایل‌ها (متر)	تعداد لایه‌ها
۵/۰۷	۱/۷۷	۱۵۸۸۸/۸۹	۱
۱۱/۳۳	۳/۹۶	۳۱۷۷/۷۷۸	۵
۱۶/۰۳	۵/۶۱	۱۵۸۸/۸۸۹	۱۰
۱۹/۶۳	۶/۸۷	۱۰۵۹/۲۵۹	۱۵
۲۲/۶۷	۷/۹۳	۷۹۴/۴۴	۲۰
۲۵/۳۵	۸/۸۷	۶۳۵/۵۵	۲۵
۲۷/۷۷	۹/۷۲	۵۲۹/۶۲	۳۰
۲۹/۹۹	۱۰/۵۰۱	۴۵۳/۹۶	۳۵
۳۲/۰۶	۱۱/۲۲	۳۹۷/۲۲	۴۰
۳۴/۰۱۱	۱۱/۹	۳۵۳/۰۸۶	۴۵
۳۵/۸۵	۱۲/۵۵	۳۱۷/۷۷	۵۰

Archive of SID

www.SID.ir

References

Abichequer, L. A., Costa, J. F. C. L., Capponi, L. N., Grasso, C. B., Pasti, H. A. & Koppe, J. C., 2009- Validating the design of blending piles through a real case study.Fourth World Conference on Sampling & Blending: 193-196.

Abichequer, L. A., Costa, J. F. C. L., Pasti, H. A. & Koppe, J. C., 2011- Design of blending piles by geostatistically simulated models - A real case reconciliation. International Journal of Mineral Processing 99: 21–26.

Beretta,F. S., Costa, J. F. C. L., Koppe, J. C. & Souza, V. C., 2010- Reducing coal quality attributes variability using properly designed blending piles helped by geostatistical simulation. International Journal of Coal Geology 84:83–93.

Costa, J. F. C. L., Koppe, J. C., Marques, D. M., Costa, M. S. A., Batiston, E. L., Pilger, G. G. & Ribeiro, D. T., 2007- Incorporating in-situ grade variability into blending piles design using geostatistical simulation. Proceedings of 3th World Conference on Sampling and Blending1: 378-390.

Marques, D. M. & Costa, J. F. C. L., 2013- An algorithm to simulate ore grade variability in blending andhomogenization piles. International Journal of Mineral Processing 120: 48–55.

Marques, D. M., Costa, J. F. C. L., Ribeiro, D. T. & Koppe, J. C., 2009- The Evidence of volume variance relationship in blending and homogenization piles using stochastic simulations.Fourth World Conference on Sampling & Blending: 235-242.

Matheron, G., 1963- Principles of geostatistics. Economic Geology 58:1246–1266.

Parker, H., 1979- The volume variance relationship: A useful tool for mine planning. Engineering and Mining Journal 180: 106–123.

Ribeiro, D. T., Stangler, R. S., Vidigal, M., Costa, J. F. C. L. & Marques, D. M., 2008- Conditional simulations to predict ore variability and homogenization pile optimal size: A case study of an Iron deposit. Proceedings of 8th International Geostatistics Congress 2: 235-241.

Tajvidi, E., Monjezi, M., Asghari, O., Emery, X. & Foroughi, S., 2013- Application of joint conditional simulation to uncertainty quantification and resource classification. Arabian Journal Geoscience: pp. 1-9.

Archive of SID

www.SID.ir

Determination of optimal size of blending piles using geostatistical simulation- A real case study

S. Foroughi [1], M. Monjezi [2*] & M. R. Khalesi [3]

[1] M.Sc. Student, Department of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[2] Associated Professor, Department of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2014 April 05 Accepted: 2015 July 26

Abstract

Fluctuation of the grade of the ore feeding the processing plants is one of the most important factors in plant's recovery, so that plant efficiency increases as the fluctuations decrease. In order to reduce the grade variability, homogenization piles are largely used in mining industry. The mass and the number of layers in the pile have an important role in the rate of grade variability reduction. The grade variability decreases as the mass and the number of layers increase, although this increase can lead to an increase in operation complexity and costs. In this research, a method based on geostatistical simulations was used to predict grade variability in the Anguran mine. In this regard, 25 equi-probable grade realizations are first generated using the Sequential Gaussian Simulation method by SGeMS Software, then the block model for each realization is built in DATAMINE Software. In the next stage, the blocks that would be sent to the pile are specified taking into account the production planning (mine schedule) obtained from NPV Software. Finally, grade variability was determined for various pile sizes and number of forming layers. Based on the obtained results, piles with a mass of 187 kt and 25 layers have the lowest variability.

Keywords: Grade variability, Homogenization pile, Geostatistical simulation.

For Persian Version see pages 181 to 190

*Corresponding author: M. Mmonjezi; E-mail: monjezi@modares.ac.ir

Archive of SID

Created with nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional