

بهبودسازی فرآیند نمونه‌برداری چال‌های استخراجی در معدن مس پورفیری میدوک و تاثیر آن در بازیابی کارخانه تغلیظ

علی رضایی^۱، حسن حاجی امین شیرازی^{۲*}، غلامرضا رحیمی‌پور^۳، محمدرضا کارگردیانتی^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان، rezaei.ali169@gmail.com

۲- استادیار بخش مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان، hshirazi@mail.uk.ac.ir

۳- استادیار بخش مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان، rahimipour@mail.uk.ac.ir

۴- مدیر امور معدن مجتمع مس سرچشمه کرمان، Dianati@nicico.com

(دریافت ۱۷ خرداد ۱۳۸۹، پذیرش ۱۰ مهر ۱۳۹۰)

چکیده

یکی از مشکلات محموله‌های ارسالی از معادن و به‌ویژه معادن روباز، کنترل عیار و مشخصات ماده معدنی است که بر کارایی کارخانه فرآوری تاثیر می‌گذارد. امروزه اهمیت نمونه‌برداری در معادن روباز به این دلیل است که برنامه‌ریزی استخراج و نوسان عیار خوراک ارسالی به کارخانه به طور عمده تابع اطلاعات نمونه‌گیری از چال‌های استخراجی است. بنابراین بهبودسازی فرآیند نمونه‌برداری به منظور افزایش بهره‌وری معدن و بازیابی کارخانه فرآوری امری ضروری است. در پژوهش حاضر، واریانس روی هم‌رفته نمونه‌برداری، واریانس‌های توزیعی، ترکیبی، آماده‌سازی و آنالیز، و واریانس تخمین بلوک‌های معدنی مختلف برآورد شده تا به کمک آن‌ها و روش‌های آماری کلاسیک بتوان نمونه‌برداری را بهبود داد. با استفاده از روش آماری طرح‌های چندعاملی، پارامترهای معدنی موثر بر بازیابی کارخانه تغلیظ، عیار مس، درصد اکسید مس و آهن و نسبت کالکوسیت به کالکوپیریت خاک معدن تعیین شدند. به کمک روش‌های آماری و زمین‌آماري به منظور کاهش خطای نمونه‌برداری از چال‌های استخراجی، محل بهینه نمونه‌برداری، مرکز بلوک، وزن بهینه جزء نمونه ۸/۲ کیلوگرم، تعداد جزء نمونه بهینه برای هر چال استخراجی چهار بدست آمد. همچنین بعد از بررسی‌های آماری انجام شده روی پارامترهای موثر بر بازیابی کارخانه تغلیظ در سطح اعتماد ۹۵٪، نسبت تاثیر و نقطه بهینه آن‌ها در بازیابی کارخانه تغلیظ بدست آمد.

کلمات کلیدی

چال‌های استخراجی، بهبودسازی، آنالیز واریانس، بازیابی تغلیظ، معدن مس میدوک

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی استخراج در معادن روباز و نوسان عیار خوراک ارسالی به کارخانه تغلیظ تابع اطلاعات حاصل از نمونه‌گیری از چال‌های استخراجی و خطاهای مربوط به مرحله برداشت، آماده‌سازی و آنالیز است. یکی از مشکلات مربوط به محموله-های ارسالی از معادن و به ویژه معادن روباز، کنترل عیار و مشخصات ماده معدنی است که بر کارایی کارخانه فرآوری تاثیر می‌گذارد. بنابراین جهت بالا بردن دقت و به حداقل رساندن نوسانات عیار خوراک کارخانه تغلیظ شناسایی خطاهای مراحل مختلف نمونه‌برداری و کاهش آنها (به خصوص خطاهای انسانی) اهمیت دارد [1].

در معدن مس میدوک واقع در 42 کیلومتری شمال شرق شهر بابک، در حال حاضر نمونه‌گیری از چال‌های استخراجی جهت ارائه طرح استخراج روزانه انجام می‌گیرد، بنابراین لازم است بهینه‌سازی نمونه‌برداری معدنی انجام شود، تا مشکل اختلاف عیار بین معدن و کارخانه تغلیظ برطرف شود. علاوه بر این با شناخت مناطق مختلف معدن از لحاظ عیار مس، درصد اکسید مس، درصد آهن، نسبت کالکوسیت به کالکوپیریت، سختی سنگ و تعیین نقطه بهینه این پارامترها بر بازیابی، می‌توان در راستای ارسال خاکی با مشخصات بهینه به کارخانه تغلیظ تلاش کرد.

2- روش تحقیق

بهینه‌سازی فرآیند نمونه‌برداری و شناسایی منابع خطا به منظور افزایش بهره‌وری معدن و بازیابی کارخانه فرآوری امری ضروری است. در این پژوهش بهینه کردن نمونه‌برداری چال‌های استخراجی در معدن مس میدوک و عوامل معدنی موثر بر بازیابی کارخانه تغلیظ بررسی شده است. به این منظور، واریانس روی هم‌رفته نمونه‌برداری و واریانس تخمین بلوک‌های معدنی مختلف برآورد شده و به کمک آن‌ها و روش‌های آماری کلاسیک نمونه‌برداری بهینه شده است.

روش مورد استفاده برای تعیین نقطه بهینه پارامترهای معدنی با بازیابی تغلیظ و همچنین بهینه کردن نمونه‌برداری، روش آماری (طرح‌های چندعاملی) است.

مسلم است که خطای نمونه‌برداری از چال‌های استخراجی، تاثیر مستقیم در کنترل عیار سنگ و جداسازی باطله از سولفور دارد که برای برآورد دقیق این خطاها و محاسبه دیگر واریانس‌ها، می‌توان از روش‌های زیر استفاده کرد.

1-2) نمونه‌برداری دو وزنی برای محاسبه واریانس نمونه‌برداری در این پژوهش، برای تخمین تغییرپذیری‌های ذاتی در یک واحد نمونه‌برداری از روش نمونه‌برداری دووزنی استفاده شده است [2].

در معدن مس میدوک، 20 نقطه نمونه‌برداری در پله‌های فعال معدن (2585، 2600، 2615) که حداکثر تغییرپذیری را از جهت نوع آلتراسیون، جنس سنگ، عیار مس، زون‌های سوپرژن و شسته شده را دارا بودند انتخاب شدند. برای برداشت نمونه‌ها، از روش نمونه‌برداری دووزنی استفاده شد.

در این روش، یک سری جزء نمونه با وزن کم (معمولاً حدود 0/1-0/5 کیلوگرم) و یک سری جزء نمونه با وزن زیاد (معمولاً حدود 10-50 کیلوگرم) برداشت می‌شوند و پس از آماده‌سازی و اندازه‌گیری کمیت مورد نظر (عیار مس)، به محاسبه واریانس‌های توزیعی، ترکیبی، نمونه‌برداری و ضریب جدایش با استفاده از روابط زیر پرداخته می‌شود (جدول 1):

$$Var(c) = \frac{\Delta m(1) \cdot \Delta m(2) \cdot [Var(1) - Var(2)]}{\Delta m(2) - \Delta m(1)} \quad (1)$$

$$Var(d) = Var(2) - \frac{\Delta m(1) \cdot [Var(1) - Var(2)]}{\Delta m(2) - \Delta m(1)} \quad (2)$$

$$Var(s) = Var(c) + Var(d) \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{Var(d)}{Var(c)}} \quad (4)$$

که در آن:

Var(c): واریانس ترکیبی، ناهمگنی بین ذرات (مقیاس میکرو)
 Var(d): واریانس توزیعی، ناهمگنی در توزیع فضایی ذرات در کل واحد نمونه‌برداری (مقیاس ماکرو)
 Var(s): واریانس نمونه‌برداری

Var(1): واریانس در سری نمونه‌های با وزن کم

Var(2): واریانس در سری نمونه‌های با وزن زیاد

Δm(1): میانگین وزن جزء نمونه‌های با وزن کم

Δm(2): میانگین وزن جزء نمونه‌های با وزن زیاد

S: ضریب جدایش که معرف بزرگی انحراف معیار ناشی از ناهمگنی در توزیع فضایی ذرات در کل واحد نمونه‌برداری (مقیاس ماکرو) به ازای یک واحد از انحراف معیار ناشی از ناهمگنی بین ذره‌ای (مقیاس میکرو) است.

جدول (1): محاسبه واریانس توزیعی، ترکیبی، نمونه‌برداری و ضریب جدایش

S	(%)Var(s)	(%)Var(d)	(%)Var(c)
1/69	0/0141	0/0094	0/0046

همان‌طور که ملاحظه می‌شود واریانس توزیعی نقش بیشتری در واریانس نمونه‌برداری دارد که نشان‌دهنده ناهمگن بودن واحد نمونه‌برداری نسبت به توزیع ذرات با جنس مختلف است و برای کاهش این نوع ناهمگنی بایستی در نمونه‌برداری نهایی از چال‌های انفجاری اهمیت بیشتری به تعداد جزء نمونه‌ها نسبت به وزن آن‌ها داده شود [3].

2-2) محاسبه واریانس مراحل آماده‌سازی و تجزیه شیمیایی

برای محاسبه واریانس هر مرحله باید نمونه‌های تکراری از آن مرحله تهیه و اندازه‌گیری شود. هرچه نتایج به دست آمده از آنالیز جزء نمونه‌های تکراری به هم نزدیک‌تر باشد، واریانس آن مرحله کمتر خواهد بود. در این پژوهش برای محاسبه واریانس روی هم‌رفته دو مرحله آماده‌سازی و آنالیز از برداشت نمونه‌های تکراری به روش دوستون مشابه به دلیل پایین بودن خطای برآورد استفاده شد.

فرمول کلی محاسبه این نوع واریانس به صورت زیر است:

$$Var (Pa) = \frac{p}{4} \left[\frac{\sum_{i=1}^n |x_{i1} - x_{i2}|}{n} \right]^2 \quad (5)$$

که در آن x_{i1} , x_{i2} مقادیر به دست آمده در هر تکرار و n تعداد زوج نمونه‌های تکراری است [2].

معنی‌داری (Significance)، که به اختصار با (sig) نشان داده می‌شود، میزان خطایی مرتکب شده در رد فرضیه صفر (H_0) است. هر چقدر مقدار Sig کمتر باشد، رد فرضیه صفر راحت‌تر می‌شود. آلفا (α) سطح خطایی است که کاربر در نظر می‌گیرد (که معمولاً 5 درصد است). به طور کلی می‌توان گفت:

$$\begin{aligned} \text{Sig} < \alpha &\longrightarrow H_0: \text{Reject} \\ \text{Sig} \geq \alpha &\longrightarrow H_0: \text{Not Reject} \end{aligned}$$

نکته مهم این است که α سطح خطای در نظر گرفته شده و Sig خطای محاسبه شده در رد H_0 است. بنابراین انتخاب سطح معنی‌داری در رد یا تایید H_0 عامل بسیار مهمی است [4].

با انجام آنالیز واریانس (جدول 3)، میانگین نمونه‌های تکراری X_1 , X_1' , X_2 و X_2' با هم مقایسه می‌شوند (جدول 2).

جدول (2): نتایج عملیات انجام گرفته بر روی 20 نمونه تکراری

$(X_1 - X_1')$	$(X_2 - X_2')$	$(X_1 - X_2)$	$(X_1' - X_2')$	$(X_1 - X_2')$	$(X_1' - X_2)$	$(X_1 - X_2)$	$(X_1' - X_2')$	شماره
0.05	0.04	0.01	0.01	0.04	0.04	0.05	0.01	1
0.06	0.04	0.02	0.02	0.02	0.04	0.06	0.02	2
0.07	0.05	0.02	0.02	0.02	0.05	0.07	0.02	3
0.08	0.06	0.02	0.02	0.04	0.06	0.08	0.02	4
0.09	0.07	0.02	0.02	0.05	0.07	0.09	0.02	5
0.10	0.08	0.02	0.02	0.06	0.08	0.10	0.02	6
0.11	0.09	0.02	0.02	0.07	0.09	0.11	0.02	7
0.12	0.10	0.02	0.02	0.08	0.10	0.12	0.02	8
0.13	0.11	0.02	0.02	0.09	0.11	0.13	0.02	9
0.14	0.12	0.02	0.02	0.10	0.12	0.14	0.02	10
0.15	0.13	0.02	0.02	0.11	0.13	0.15	0.02	11
0.16	0.14	0.02	0.02	0.12	0.14	0.16	0.02	12
0.17	0.15	0.02	0.02	0.13	0.15	0.17	0.02	13
0.18	0.16	0.02	0.02	0.14	0.16	0.18	0.02	14
0.19	0.17	0.02	0.02	0.15	0.17	0.19	0.02	15
0.20	0.18	0.02	0.02	0.16	0.18	0.20	0.02	16
0.21	0.19	0.02	0.02	0.17	0.19	0.21	0.02	17
0.22	0.20	0.02	0.02	0.18	0.20	0.22	0.02	18
0.23	0.21	0.02	0.02	0.19	0.21	0.23	0.02	19
0.24	0.22	0.02	0.02	0.20	0.22	0.24	0.02	20
0.25	0.23	0.02	0.02	0.21	0.23	0.25	0.02	میانگین

* اعداد برحسب درصد می‌باشند.

جدول (3): آنالیز واریانس برای نمونه‌های تکراری

Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
0.000	3	.000	.002	.1000
48.918	78	.617		
48.918	78			

همانطور که در جدول (3) مشاهده می‌شود ضریب sig.level در سطح اعتماد 95 درصد بیشتر از 0/05 می‌باشد، از طرفی دیگر F محاسباتی کمتر از F جدول آماری است، بنابراین میانگین‌ها اختلاف معنی‌داری نداشته و خطاها همگی تصادفی می‌باشند و در نتیجه خطای سیستماتیک قابل تشخیصی وجود ندارد.

با استفاده از فرمول واریانس برای نمونه‌های تکراری:

واریانس آماده‌سازی و آنالیز

$$Var(pa) = \frac{p}{4} \left[\frac{\sum_{i=1}^n |x_{i1} - x_{i2}| + \sum_{i=1}^n |x'_{i1} - x'_{i2}|}{2n} \right]^2 = \frac{p}{4} (0.056)^2 = 0.002462$$

واریانس آنالیز شیمیایی

$$Var(a) = \frac{p}{4} \left[\frac{\sum_{i=1}^n |x_{i1} - x'_{i1}| + \sum_{i=1}^n |x_{i2} - x'_{i2}|}{2n} \right]^2 = \frac{p}{4} (0.055)^2 = 0.002375$$

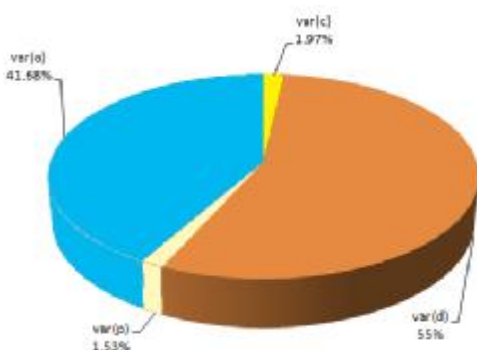
واریانس آماده‌سازی در معدن

$$var(p) = var(pa) - var(a) = 0.002462 - 0.002375 = 0.000087$$

$$Var(t) = \frac{4/6 \times 10^{-3}}{3 \times 15} + \frac{9/4 \times 10^{-3}}{3} + \frac{1/87 \times 10^{-4}}{3} + \frac{2/375 \times 10^{-3}}{3} = 5/7 \times 10^{-3} (\%)^2$$

$$S = \sqrt{0.0057} = 0.075$$

$$\bar{X} \pm ZS \Rightarrow \bar{X} \pm 1/96 \times 0.075 = \bar{X} \pm 0.00078$$



شکل (1): مولفه‌های واریانس روی هم‌برفته نمونه‌برداری در حالت برداشت سه جزء نمونه 15 کیلوگرمی از هر بلوک

همان‌طور که در شکل (1) مشاهده می‌شود سهم واریانس نمونه‌برداری از واریانس آماده‌سازی و آنالیز بیشتر است. وزن جزء نمونه‌ها در حالت فعلی معدن زیاد انتخاب شده که باعث افت بیش از حد واریانس ترکیبی شده است در صورتی که باید با افزایش تعداد جزء نمونه و کاهش وزن آن (تا حد بهینه) واریانس توزیعی را کاهش داده تا هر دو سهم مساوی در واریانس نمونه‌برداری داشته و باعث افت آن شود.

در این پژوهش، برای پیدا کردن وزن بهینه جزء نمونه‌ها از منحنی دووزنی (وزن جزء نمونه - واریانس) و روش دووزنی با گرفتن دو جزء نمونه با وزن‌های متفاوت در سطح اعتماد 95 درصد استفاده می‌شود. با استفاده از واریانس روی هم‌برفته نمونه‌برداری و روش آماری کلاسیک آنالیز واریانس، تعداد جزء نمونه بهینه تعیین می‌شود [2]، [5]، [6]. مکان‌های بهینه نمونه‌برداری با استفاده از روش زمین آماری واریانس تخمین بلوک‌های معدنی تعیین می‌شود [7]، [8].

4-2) تعیین محل بهینه نمونه‌برداری از هر بلوک استخراجی

در معادن روباز، به طور رایج از اطلاعات عیاری چال‌های استخراجی برای کنترل کیفیت عیار ماده معدنی استفاده می‌شود. با توجه به این‌که در هر الگوی حفاری چال در مرکز بلوک حفر می‌شود، بنابراین نمونه نیز از پودر حاصل از

باید توجه شود که واریانس آماده‌سازی فقط شامل آماده‌سازی نمونه در معدن است و واریانس آنالیز شامل واریانس اندازه‌گیری و واریانس آماده‌سازی نمونه‌ها در نمونه‌کوبی آزمایشگاه است.

برای محاسبه واریانس آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه 20 نمونه x'_2 انتخاب شدند تا آنالیز مجدد شوند.

$$Var(a_a) = \frac{p}{f} \left[\frac{\sum_{i=1}^f |x_{i1} - x'_{i1}|}{n} \right]^2 = \frac{p}{f} (0.051)^2 = 2/0.42 \times 10^{-4}$$

$$var(p_a) = var(a) - var(a_a) = 2/375 \times 10^{-3} - 2/0.42 \times 10^{-4} = 3/3 \times 10^{-4}$$

3-2) محاسبه واریانس روی هم‌برفته نمونه‌برداری

کمیتی آماری است که برای سنجش دقت روی هم‌برفته مراحل مختلف نمونه‌برداری، آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌ها به کار می‌رود. مقدار این واریانس معادل مجموع واریانس‌های مراحل سه‌گانه بالا است. واضح است که برای تعیین آن باید مقدار هر یک از سه واریانس معلوم باشد. رابطه واریانس کلی عملیات را می‌توان به صورت زیر نوشت [1]:

$$var(t) = \frac{var(c)}{k \cdot \Delta m \cdot n} + \frac{var(d)}{k \cdot n} + \frac{var(p)}{K \cdot k} + \frac{var(a)}{K \cdot k \cdot i} \quad (6)$$

که در آن:

n: تعداد جزء نمونه در هر پشته

Δm : جرم جزء نمونه‌ها (kg)

k: تعداد پشته

K: تعداد نمونه‌های آنالیز شده از هر پشته

i: تعداد دفعات تکرار اندازه‌گیری

پشته¹، واحد سازنده یک محموله از مواد معدنی است که برای اندازه‌گیری هر کمیتی دلخواه در آن باید به برداشت حداقل یک «نمونه کلی» از آن اقدام کرد.

حال می‌توان سهم هر مؤلفه را در میانگین واریانس روی هم‌برفته نمونه‌برداری در حالتی که از هر پشته (بلوک معدنی) سه جزء نمونه 15 کیلوگرمی برداشت شود و نمونه تکراری و آنالیز مجدد وجود نداشته باشد، حساب کرد (حالت فعلی). در این صورت واریانس کلی و حدود اطمینان عیار هر بلوک به قرار زیر است:

چالزنی برداشت می‌شود. الگوی حفاری بهینه در معدن مس میدوک بلوک به اندازه $6/5 \times 8/5 \times 15$ متر است. با محاسبه واریانس تخمین در حالت‌های مختلف قرارگیری نمونه، حالتی که واریانس تخمین آن حداقل باشد، حالت بهینه خواهد بود. با داشتن مشخصات واریوگرام تجربی (مدل واریوگرام، اثر قطعه‌ای، آستانه، شعاع تاثیر) که از تلفیق داده‌های اکتشافی و استخراجی در معدن مس میدوک بدست آمده و همچنین استفاده از واریانس تخمین و توابع کمکی می‌توان محل نمونه‌برداری را بهینه کرد. مشخصات واریوگرام معدن مس پورفیبری میدوک (محدوده مورد مطالعه) در جدول (4) آمده است.

جدول (4): پارامترهای واریوگرام معدن مس پورفیبری میدوک

مدل واریوگرام	شعاع تاثیر (A)	مقدار اثر قطعه-ای (Co)	مقدار آستانه (Co+C)
کروی	65 متر	صفر	0/486

جدول (5): محاسبه واریانس تخمین در حالت‌های مختلف قرارگیری نمونه برای بلوک به اندازه $6/5 \times 8/5 \times 15$ متر

شماره	موقعیت چال استخراجی	واریانس تخمین
1	مرکز	0/054
2	یک گوشه	0/086
3	مرکز ضلع بزرگتر	0/058
4	مرکز ضلع کوچکتر	0/062

همان طور که مشاهده می‌شود بهترین حالت برای محل چال‌های استخراجی مرکز بلوک ماده معدنی است که مقدار واریانس تخمین آن در معدن مس پورفیبری میدوک $0/054$ ($\%^2$) بدست آمده است.

5-2) برآورد وزن بهینه جزء نمونه‌ها بر اساس واریانس نمونه برداری

واریانس نمونه‌برداری مجموع دو واریانس ترکیبی و توزیعی می‌باشد [2]، [5]. وزن بهینه هر جزء نمونه گرفته شده از چال استخراجی براساس اجزاء واریانس نمونه‌برداری (واریانس ترکیبی، واریانس توزیعی) توسط رابطه (9) محاسبه می‌شود [1].

$$Var(c) = \frac{Var(c)}{\Delta m \cdot n \cdot k} \quad (7)$$

$$Var(d) = \frac{Var(d)}{n \cdot k} \quad (8)$$

$$(9)$$

$$\Rightarrow \frac{Var(c)}{\Delta m \cdot n \cdot k} = \frac{Var(d)}{n \cdot k} \Rightarrow \frac{Var(c)}{\Delta m} = Var(d) \Rightarrow \Delta m = \frac{Var(c)}{Var(d)}$$

که در آن:

$Var(c)$: واریانس ترکیبی

$Var(d)$: واریانس توزیعی

n : تعداد جزء نمونه در هر پشته

Δm : جرم جزء نمونه‌ها (kg)

k : تعداد نمونه تکراری

با استفاده از رابطه (9) وزن بهینه جزء نمونه‌ها برای 20 نقطه نمونه‌برداری شده در پله‌های مختلف معدن محاسبه شد. براساس نتایج حاصل شده، وزن‌های کمینه، بیشینه و میانگین جزء نمونه‌ها به ترتیب 0/057، 8/157 و 1/321 کیلوگرم است. به منظور پیدا کردن وزن بهینه جزء نمونه‌ها، نیاز به ایجاد منحنی دووزنی (وزن جزء نمونه - واریانس) در مقیاس تمام لگاریتمی است. چون نسبت میانگین وزن جزء نمونه‌های سنگین به سبک بزرگتر از 10 است (50 به 0/5 کیلوگرم)، بنابراین نمی‌توان تغییرات لگاریتم واریانس نمونه‌برداری را نسبت به لگاریتم وزن جزء نمونه‌ها برای محدوده مورد نظر خطی فرض کرد و مقدار انحراف آن از خط راست متناسب با افزایش نسبت بالا است؛ برای رسم منحنی آن حداقل به سه نقطه ابتدایی، انتهایی و یک نقطه دیگر نیاز است (جدول 6). در اینجا مقدار واریانس‌های توزیعی و ترکیبی بدست آمده به ترتیب 0/0094 و 0/0046 است. واریانس نمونه‌برداری برای نمونه‌های Δm کیلوگرمی از رابطه (10) محاسبه می‌شود:

$$Var(S) = \frac{Var(C)}{\Delta m \cdot n} + \frac{Var(d)}{n} \quad (10)$$

برای نمونه‌های یک کیلوگرمی:

$$Var(S) = 4/6 \times 10^{-3} + 9/4 \times 10^{-3} = 1/40 \times 10^{-2}$$

جدول (6): مشخصات سه نقطه مورد نیاز برای رسم منحنی دووزنی در مقیاس تمام لگاریتمی

مشخصات نمونه	وزن نمونه (kg)	واریانس
وزن سبک	0/522	$1/82 \times 10^{-2}$
وزن متوسط	1	$9/49 \times 10^{-3}$
وزن سنگین	49/780	$1/40 \times 10^{-2}$

با توجه به اینکه هر نمونه تجزیه‌ای یک‌بار آنالیز می‌شود ($i=1$) و نمونه تکراری نیز وجود ندارد ($k=1$) همچنین با یک پشته سروکار داریم، بنابراین $K = 1$ است. با معلوم بودن مقادیر واریانس‌های ترکیبی و توزیعی، واریانس آماده‌سازی و آنالیز و قرار دادن آن‌ها در رابطه خواهیم داشت ($\Delta m = 8/157 \text{ kg}$) در نظر گرفته شده است)

$$Var(t) = \frac{4/6 \times 10^{-2}}{8/157 \cdot n} + \frac{9/4 \times 10^{-2}}{n} + 0/000087 + 0/002375$$

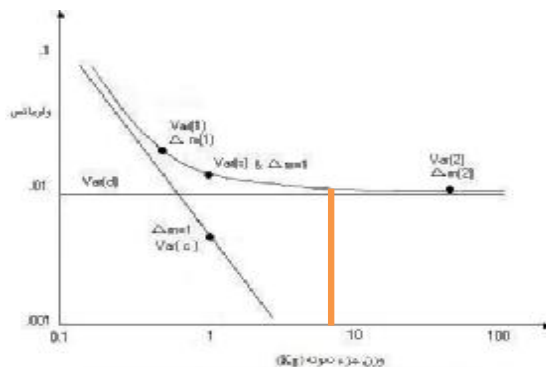
تعداد جزء نمونه بهینه به شکلی در نظر گرفته می‌شود که به ازای آن سهم واریانس نمونه‌برداری و واریانس آماده‌سازی، آنالیز در واریانس روی هم‌رفته نمونه‌برداری یکسان باشد [2]، [5]. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{4/6 \times 10^{-2}}{8/157 \cdot n} + \frac{9/4 \times 10^{-2}}{n} = 0/000087 + 0/002375 \Rightarrow n = 4/05 \Rightarrow n \cong 4$$

برای حالت فعلی که نمونه‌های 15 کیلوگرمی برداشت می‌شود تعداد جزء نمونه 3/94 بدست می‌آید که اگر آن را 3 در نظر گرفت واریانس آماده‌سازی و آنالیز کمتر از واریانس نمونه‌برداری و اگر 4 در نظر گرفته شود واریانس آماده‌سازی و آنالیز بیشتر از واریانس نمونه‌برداری خواهد شد. در حالت بالا (وزن جزء نمونه 8/157 کیلوگرم و تعداد جزء نمونه 4) اگر واریانس معادل دقت دلخواه کمتر از واریانس محاسباتی باشد بای‌n برای کاهش واریانس نمونه‌برداری (به خصوص واریانس توزیعی) تعداد جزء نمونه را افزایش داد و برای کاهش واریانس آماده‌سازی و آنالیز (به خصوص واریانس آنالیز) اگر امکان تغییر روش آنالیز و یا استفاده از دستگاه‌های دقیق‌تر وجود نداشته باشد تنها راه جهت کاهش واریانس آنالیز، اندازه‌گیری مجدد نمونه‌هاست.

2-7) بهینه‌سازی حداقل تعداد جزء نمونه با استفاده از آنالیز واریانس

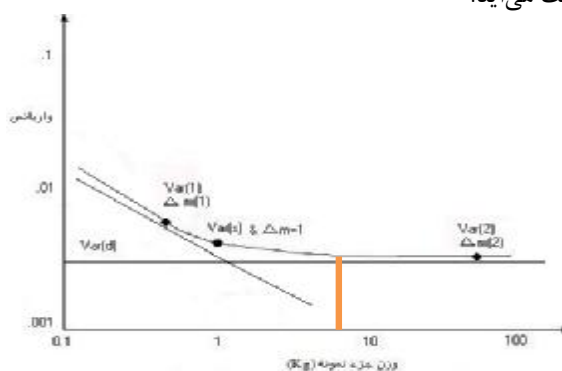
ابزار آماری مفید دیگر برای شناسایی منبع تغییرات و بهینه‌سازی تعداد جزء نمونه، آنالیز واریانس است [9]، [10]. در پژوهش حاضر، نیاز به آن است که حداقل تعداد ظروف نمونه‌برداری که در اطراف سرمته حفاری قرار می‌گیرند بهینه شوند. با انجام طراحی آزمایش در طرح یک عاملی و یک عاملی بلوک‌بندی شده، نمونه‌ها در چهار سطح، دو ظرفی، سه ظرفی، شش ظرفی و نه ظرفی در اطراف سرمته حفاری با آنالیز Cu، Fe و CuO بررسی می‌شوند. در اینجا، تنها نتایج بدست آمده برای محیط‌های ناهمگن در معدن مس میدوک بررسی می‌شوند، چون در مناطق تقریباً همگن، تفاوت معناداری میان سطوح (تعداد ظروف نمونه‌برداری) نشان نداد



شکل (2): نمودار لگاریتم (واریانس - وزن جزء نمونه) در حالت برداشت 1 جزء نمونه از هر چال استخراجی

همان‌طور که در شکل (2) مشاهده می‌شود از وزن نمونه 8 کیلوگرمی به بعد شیب منحنی به شدت کاهش یافته و افت شدیدی در واریانس دیده نمی‌شود. لذا می‌توان به طور متوسط از هر بلوک معدنی جزء نمونه 8 کیلوگرمی برداشت کرد.

در حال حاضر در معدن مس پورفیری میدوک، تعداد 3 جزء نمونه برداشت می‌شود که در این حالت مقادیر واریانس به ازای وزن‌های مختلف محاسبه شده و نمودار آن بصورت زیر بدست می‌آید:



شکل (3): نمودار لگاریتم (واریانس - وزن جزء نمونه) در حالت برداشت 3 جزء نمونه از هر چال استخراجی

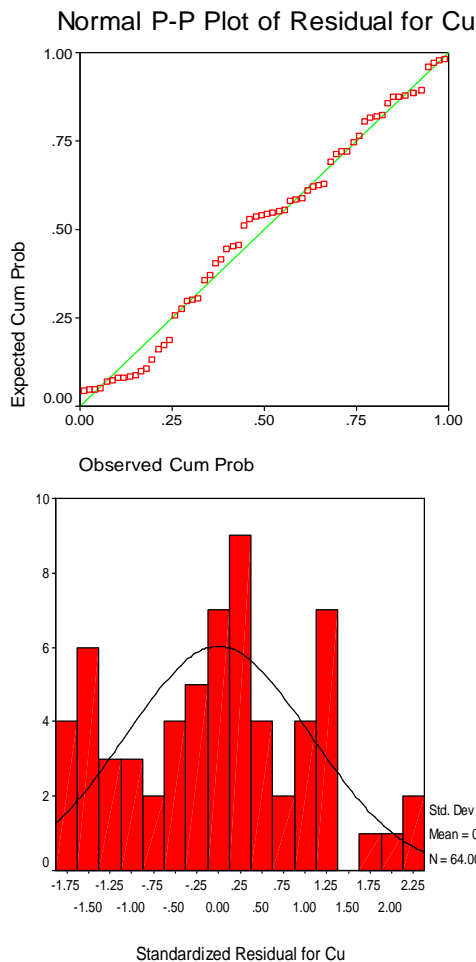
همان‌طور که در شکل (3) مشخص است برای بدست آوردن واریانس کمتر از واریانس محاسبه شده برای نمونه‌های 8/157 کیلوگرمی راه‌حل، افزایش وزن جزء نمونه‌ها نیست چون از این وزن به بعد منحنی تقریباً حالتی با شیب صفر به خود می‌گیرد، پس بهتر است تعداد جزء نمونه‌ها افزایش یابد.

2-6) بهینه‌سازی تعداد جزء نمونه برداشت شده از هر بلوک استخراجی

برای یافتن تعداد جزء نمونه‌های لازم، می‌توان از فرمول واریانس روی هم‌رفته استفاده کرد [2].

$$Var(t) = \frac{Var(c)}{K \cdot \Delta m \cdot n} + \frac{Var(d)}{K \cdot n} + \frac{Var(p)}{K \cdot k} + \frac{Var(a)}{K \cdot k \cdot i} \quad (11)$$

نمونه‌های 2 ظرفی به سمت نمونه‌های 9 ظرفی پراکندگی کمتری داشته و توزیع آنها نرمال بوده و میانگین آنها نیز صفر است که نشان دهنده اعتبار بالای مدل یک عاملی بلوک‌بندی شده است (شکل 4). لازم به ذکر است به دلیل این‌که مشخص کردن مناطق همگن و ناهمگن در معدن کار دشواری است تعداد 3 جزء نمونه را می‌توان حالت بهینه دانست و از تمامی چال‌های استخراجی حداقل 3 جزء نمونه برداشت کرد. برای دقت بیشتر (برای کاهش خطای تصادفی ناشی از واریانس توزیعی) باید تعداد جزء نمونه از 3 بیشتر باشد ولی کاهش تعداد جزء نمونه کمتر از 3 باعث به وجود آمدن خطای سیستماتیک و زیر سوال رفتن صحت نمونه-برداری می‌شود.



شکل (4): نمودار هیستوگرام و احتمال نرمال مربوط به باقیمانده‌های طرح بلوک بندی شده برای مس در مناطق غیرهمگن

(8-2) شناسایی پارامترهای معدنی موثر در بازیابی کارخانه تغلیظ با استفاده از روش آماری طرح‌های چندعاملی، پارامترهای

(جدول 7). در مناطق ناهمگن، در طرح یک عاملی بلوک‌بندی شده، مشاهده می‌شود که برای مس و اکسید مس، ضریب sig. level کمتر از 0/05 است در نتیجه در محیط‌های ناهمگن تعداد ظرف نمونه‌گیری (جزء نمونه) به عنوان یک عامل مهم و تاثیرگذار در عیار مطرح است (جدول 8).

جدول (7): اختلاف بین میانگین عیار جزء نمونه‌های مختلف در مناطق تقریباً همگن در طرح عاملی بلوک‌بندی شده برای مس

Multiple Comparisons

Dependent Variable: CU

LSD

(I) PAN	(J) PAN	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2	3	-1.500E-02	2.281E-02	.514	-6.09E-02	3.094E-02
	6	-1.000E-02	2.281E-02	.663	-5.59E-02	3.594E-02
	9	3.125E-03	2.281E-02	.892	-4.28E-02	4.907E-02
3	2	1.500E-02	2.281E-02	.514	-3.09E-02	6.094E-02
	6	5.000E-03	2.281E-02	.827	-4.09E-02	5.094E-02
	9	1.813E-02	2.281E-02	.431	-2.78E-02	6.407E-02
6	2	1.000E-02	2.281E-02	.663	-3.59E-02	5.594E-02
	3	-5.000E-03	2.281E-02	.827	-5.09E-02	4.094E-02
	9	1.312E-02	2.281E-02	.568	-3.28E-02	5.907E-02
9	2	-3.125E-03	2.281E-02	.892	-4.91E-02	4.282E-02
	3	-1.813E-02	2.281E-02	.431	-6.41E-02	2.782E-02
	6	-1.312E-02	2.281E-02	.568	-5.91E-02	3.282E-02

Based on observed means.

جدول (8): اختلاف بین میانگین عیار جزء نمونه‌های مختلف در مناطق ناهمگن در طرح عاملی بلوک‌بندی شده برای مس

Multiple Comparisons

Dependent Variable: OBS

LSD

(I) PAN	(J) PAN	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2.00	3.00	-3.167E-02*	1.396E-02	.027	-5.95E-02	-3.80E-03
	6.00	-4.042E-02*	1.396E-02	.005	-6.83E-02	-1.26E-02
	9.00	-4.208E-02*	1.396E-02	.004	-6.99E-02	-1.42E-02
3.00	2.00	3.167E-02*	1.396E-02	.027	3.801E-03	5.953E-02
	6.00	-8.750E-03	1.396E-02	.533	-3.66E-02	1.912E-02
	9.00	-1.042E-02	1.396E-02	.458	-3.83E-02	1.745E-02
6.00	2.00	4.042E-02*	1.396E-02	.005	1.255E-02	6.828E-02
	3.00	8.750E-03	1.396E-02	.533	-1.91E-02	3.662E-02
	9.00	-1.667E-03	1.396E-02	.905	-2.95E-02	2.620E-02
9.00	2.00	4.208E-02*	1.396E-02	.004	1.422E-02	6.995E-02
	3.00	1.042E-02	1.396E-02	.458	-1.74E-02	3.828E-02
	6.00	1.667E-03	1.396E-02	.905	-2.62E-02	2.953E-02

Based on observed means.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

بررسی مقادیر sig. level در جدول (8) نشان می‌دهد که در طرح عاملی بلوک‌بندی شده، میانگین نمونه‌های 2 ظرفی اختلاف معنی‌داری با میانگین نمونه‌های 3، 6 و 9 ظرفی دارند (sig < 0/05)، اما نمونه‌های سه ظرفی، شش ظرفی و نه ظرفی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند (sig > 0/05). در نتیجه تعداد 3 جزء نمونه برای نمونه‌های مناطق ناهمگن حالت بهینه خواهد بود. باقیمانده‌های حاصل از طرح بلوک‌بندی را می‌توان با تعیین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر برازش شده محاسبه کرد که این باقیمانده‌ها از

این پارامترها اثر متقابل در بازیابی تغلیظ نداشته (یعنی تفاوت بین سطوح یک عامل در تمام سطوح عوامل دیگر یکسان است) و نقطه بهینه آنها $10 < \text{CuO} \leq 0.12/95 < \text{Cu} \leq 4$ ، $\text{Fe} \leq 4$ است. قابل ذکر است که نقاط بهینه براساس نتایج باقیمانده‌ها (Residuals) با شرایط پراکندگی کمتر، توزیع نرمال و میانگین صفر تعیین شده است. این پارامترها در حال حاضر در برنامه پیشنهادی مشخص شده و در طول زمان بایستی تغییرات اجباری طرح و همچنین نتایج این تغییرات را بر خوراک کارخانه تغلیظ ارزیابی و بررسی کرد. سپس طرح-های جانشین منطقی ارائه داد. قابل ذکر است که نتایج بدست آمده مربوط به پله‌های 2585، 2600 و 2615 معدن مس میدوک است.

3- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در بهینه‌سازی نمونه‌برداری از چال‌های استخراجی در معدن مس میدوک، نشان می‌دهد که محل بهینه نمونه برداری، مرکز بلوک، وزن بهینه جزء نمونه، 8/2 کیلوگرم و تعداد بهینه جزء نمونه 4 عدد تعیین شده است. همچنین این نتیجه حاصل شد که در مناطق همگن تفاوت معناداری میان عیار بدست آمده از نمونه‌ها با تعداد متفاوت جزء نمونه‌ها وجود ندارد.

با مقایسه نتایج نمونه‌گیری از چال‌های استخراجی در حالت‌های مختلف مشخص شد که روش نمونه‌گیری با سه ظرف، اگر به نحو صحیح انجام گیرد، حالت بهینه خواهد بود (تعداد ظروف نمونه‌برداری در اطراف هر سرمرته حفاری، 3 ظرف با زاویه 120 درجه باشد، به شرطی که از وسایل نمونه‌برداری استاندارد استفاده شود و با تقسیم‌کن استاندارد مراحل کاهش وزن صورت گیرد به طوری که نمونه ارسالی به آزمایشگاه حدود 2/5 تا 3 کیلوگرم باشد).

پارامترهای معدنی موثر بر بازیابی کنسانتره تغلیظ عیار مس، درصد CuO، درصد Fe، نسبت کالکوسیت به کالکوپیریت و تا حدودی سختی سنگ بوده و نقطه بهینه این عوامل، $(\% \text{Fe} \leq 4, 10 < \% \text{CuO} \leq 12, 0.95 < \% \text{Cu} \leq 1.00)$ است.

در شرایط ایده‌آل نیز عیار خوراک کارخانه مقداری نوسان خواهد داشت که به تغییرات ذاتی واحد نمونه‌برداری، تابع تغییرنمای معدن، الگوی حفاری و واریانس‌های آماده‌سازی و آنالیز مربوط می‌شود.

معدنی مؤثر بر بازیابی کارخانه تغلیظ، عیار مس، درصد اکسید مس، آهن و نسبت کالکوسیت به کالکوپیریت خاک معدن تعیین می‌شود. علاوه بر این که عیار خاک ارسالی نباید نوسانات زیادی داشته باشد، پارامترهایی همچون عیار مس، درصد اکسید مس، درصد آهن و نسبت کالکوسیت به کالکوپیریت بعد از بررسی‌های انجام شده توسط آزمون‌های آماری، جداول آنالیز واریانس و نمودارهای اثر متقابل، مهم شناخته شده‌اند (در سطح اعتماد 95٪) و باید مقادیر آن‌ها در حد قابل قبولی تنظیم شوند. برای تعیین نقطه بهینه پارامترهای عیار مس، درصد اکسید مس، درصد آهن، نسبت کالکوسیت به کالکوپیریت و بازیابی تغلیظ از نرم افزار آماری SPSS، بخش آنالیز واریانس طرح‌های چندعاملی استفاده می‌شود. مقدار تاثیر این پارامترهای معدنی بر روی بازیابی تغلیظ (بدون در نظر گرفتن عوامل کنترل کننده و تاثیرگذار واحد تغلیظ نظیر خردایش، مواد شیمیایی و ...) بعد از بررسی‌های انجام شده بصورت زیر بدست می‌آید:

$$90/195 + 0/215A - 2/350B - 2/110C = \text{بازیابی}$$

که در آن A مربوط به هفت سطح عیاری مس و B و C هر کدام به ترتیب مربوط به سه سطح درصد اکسید مس و آهن می‌باشد. به تجربه ثابت شده است که کارخانه تغلیظ نسبت به سطوح در نظر گرفته شده برای اکسید مس و آهن حساسیت نشان می‌دهد و بازیابی افت می‌کند. در رابطه به-دست آمده بازیابی از روش رگرسیون نیز مشاهده می‌شود که بازیابی نسبت به سطوح مس حساسیت نشان نمی‌دهد (علامت مثبت) اما نسبت به اکسید مس و آهن (علامت منفی) حساسیت نشان می‌دهد. هفت سطح عیاری مس (بر اساس نتایج کارخانه تغلیظ) در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

- 1- $\text{Cu} \leq 0.90$
- 2- $0.90 < \text{Cu} \leq 0.95$
- 3- $0.95 < \text{Cu} \leq 1.00$
- 4- $1.00 < \text{Cu} \leq 1.05$
- 5- $1.05 < \text{Cu} \leq 1.10$
- 6- $1.10 < \text{Cu} \leq 1.15$
- 7- $\text{Cu} \geq 1.15$

سه سطح عیاری درصد اکسید مس (بر اساس نتایج کارخانه تغلیظ) در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

- 1- $\text{CuO} \leq 10$
- 2- $10 < \text{CuO} \leq 12$
- 3- $\text{CuO} \geq 12$

سه سطح عیاری درصد آهن (بر اساس نتایج کارخانه تغلیظ) در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

- 1- $\text{Fe} \leq 4$
- 2- $4 < \text{Fe} \leq 5$
- 3- $\text{Fe} \geq 5$

4- تقدیر و تشکر

نویسندگان از امور تحقیق و توسعه واحد تحقیقات معدنی شرکت ملی صنایع مس ایران (به خصوص مهندس احمد آتش‌پنجه و مهندس مجید خسروجردی) به دلیل حمایت مالی این پژوهش و همچنین امور معدن مجتمع مس میدوک (به خصوص مهندس محمدرضا رضانی و سرکار خانم مهندس زهرا عباسلو) قدردانی می‌کنند.

منابع

- [1] رضایی، علی؛ (1388)؛ بهینه‌سازی نمونه‌برداری به منظور کاهش نوسان عیار سنگ خوراک ارسالی به سنگ‌شکن اولیه در معدن مس میدوک؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ صفحه 131.
- [2] حسینی‌پاک، علی‌اصغر؛ (1380)؛ نمونه‌برداری معدنی؛ انتشارات دانشگاه تهران.

- [3] Pitard, F. 1997; *Sampling*; Australian Mineral foundation Publication, 575p.
- [4] مومنی، منصور؛ (1387)؛ تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS؛ انتشارات کتاب‌نو.
- [5] Merks, J.W; 1985; *Sampling and Weighing of Bulk Solids*, Trans Tech Publications, Golf Publishing Company. pp.410.
- [6] Miller and Miller; 1989; *Statistics for Analytical Chemistry*, pp. 227.
- [7] David, M.; 1982; *Geostatistical Ore Reserve Estimation*, Elsevier Scientific Publishing CO.
- [8] Rendu, J. M.; 1981; *An Introduction to Geostatistical Methods of Mineral Evaluation*, South African Institute of Mining and Metallurgy Publication , pp. 83..
- [9] Anderson, R.; 1987; *Practical Statistics for Analytical Chemists*, pp.316.
- [10] Walpole, R.E; 1972; *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, pp. 580.