تعیین حداقل نمونه لازم برای اندازه‌گیری درجه آزادی کانه‌های مس‌دار در معدن مس سرچشمه

نوشته : دکترصمد بنیسی*، حمید رضا ایرانمنش، دکترمحمد رضا شایسته فر*** و مینو بهروز*****

A minimum Sample Weight Required for Liberation Analysis of Copper - Bearing Minerals at the Sarcheshmeh Copper Mine

By: Dr. S. Banisi*, H.R. Iranmanesh, Dr. M.R. Shayestehfar***& M. Behrouz*****

چکیده

تعیین درجه آزادی کانه‌های با ارزش در کانسنگ آسیا شده برای مشخص کردن کارایی مرحله خردایش و همچنین عملکرد فرایند جدایش در فراوری مواد معدنی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ازآنجا که برای تهیه مقاطع صیقلی نیاز به قالب‌گیری ذرات است، ریزنمونه برداری و قالب‌گیری در برآورد درجه آزادی مؤثر است.

در مجتمع مس سرچشمه برای قالب‌گیری ذرات از روش گرمایی تحت فشار (۳۰۰° F و ۴۰۰۰psi) استفاده می شود. در این مقاله، روش تعیین درصد وزنی کانه‌های مس‌دار (کلکوپیریت، کلکوسیت و کوولیت) و چگونگی محاسبه خطای برآورد درجه آزادی آنها، بررسی می‌شود. برای به‌دست آوردن نسبت وزنی مناسب نمونه کانسنگ آسیا شده به پودر قالب‌گیری، ۱۰ نمونه با ۵ نسبت وزنی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بهترین نسبت وزنی که کمترین خطا را به همراه داشت، نسبت ۴ گرم نمونه سنگ معدن به ۱۱ گرم پودر قالب گیری به‌دست آمد. همچنین حداقل ذره لازم برای بررسی میکروسکوپی برای به‌دست آوردن درجه آزادی هر یک از کانیها تعیین شد.

کلید واژه‌ها: آزادشدگی، قالب‌گیری ذرات، مقدار نمونه، درجه آزادی، خطای درجه‌آزادی

Abstract

Measurement of liberation degree is of prime importance in determination of grinding and separation circuits performance. Subsampling and particles mounting, which are the main stages in the preparation of polished sections, could affect liberation degrees obtained by the mineral counting method.

At the Sarcheshmeh copper mine, particles mounting is carried out at high pressure (4000 psi) and high temperature (300°F). In this paper, the method of percent weight determination of copper - bearing minerals (chalcopyrite, chalcocite and covellite) and the error on liberation degree estimation are discussed. In order to determine the appropriate weight ratio of sample to mounting powder, 10 samples with five different weight ratios were examined. It was found that the weight ratio of 4g sample to 11g mounting powder had the lowest error. For each mineral, the minimum number of particles, which must be examined to reach an acceptable accuracy were determined.

Keywords: Liberation, Particle mounting, Polished sections, Sample weight

۱- مقدمه

از دهه ۱۹۹۰ به بعد، مبانی نظری و چگونگی اندازه‌گیری میزان آزادشدگی کانیها به حدی توسعه یافت که امروزه از این اطلاعات، می‌توان به طور مستقیم در فراوری مواد استفاده کرد. با کاهش عیار کانسنگها، آزادشدگی ناقص کانی و تأثیر آن بر کارایی اقتصادی و عملیاتی فرایندهای بازیابی کانی، در چند دهه اخیر، اهمیت بیشتری یافته است. مدل گودین (Gaudin) که در نیمه دوم سدهء بیستم ارائه شد، سهم زیادی در پژوهشهای مربوط به چگونگی آزادشدگی داشته است.

گودین مشکل تعیین آزادشدگی را به شکل هندسی ذرات نسبت داده است (Gaudin) و برخی پژوهشگران نیز به تأثیر شکل ذرات در تعیین آزادشدگی کانیها اشاره کرده‌اند(Particles mounting).

آزادشدگی کانی، بیشتر با مطالعهء مقاطع صیقلی، اندازه‌گیری شده و به‌صورت نسبت کانی آزادشده به کل کانی موجود (آزاد و قفل) برآورد می‌شود. درعمل، آزادشدگی کانیها بیش از میزان واقعی آن گزارش می‌شود، زیرا تنها دو بعد از سه بعد ذرات در این نوع بررسی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تبدیل درجه آزادی ظاهری به درجه آزادی واقعی، مدلهای ریاضی زیادی پیشنهاد شده و مقایسه‌هایی نیز بین نتایج آنها صورت گرفته است (Bakelite, Touching particles, Subsampling).

در این مقاله، افزون بر تعیین درصد وزنی و درجه آزادی کانیهای مس‌دار (کلکوسیت، کلکوپیریت و کوولیت) نمونه کانسنگ مس سرچشمه به روش مطالعه میکروسکوپی، نسبت وزنی مناسب نمونه به پودر قالب‌گیری برای تهیه قرص مقطع صیقلی برای تحلیل آزادشدگی ارائه می‌شود.

۲- مبانی نظری

۲-۱- خطای دید در تعیین فراوانی کانیها و درجه آزادی آنها

در بررسیهای مقاطع صیقلی زیر میکروسکوپ، همواره یک خطای ذاتی در تمام اندازه‌گیریهای درجه آزادی وجود دارد که به‌نام خطای بعد سوم معروف است (Stereology). این خطا از آنجا ناشی می‌شود که اطلاعات به دست آمده ، از سطح دو بعدی است، درصورتی که متغیر مورد نظر، یعنی درجه آزادی، سه بعدی می‌باشد. باید توجه داشت که این خطا مستقل از خطاهای عملیاتی و چگونگی اندازه‌گیری است.

هنگام تهیه مقاطع صیقلی، ذرات آزاد همواره در هرجهت که بریده شوند، مقاطع آزاد ایجاد می‌کنند، اما ذرات قفل شده می‌توانند مقاطع قفل شده یا آزاد به‌وجود آورند (شکل ۱). این مسئله سبب بروز مقاطع آزاد دروغین و بیش برآورد میزان ذرات آزاد می‌شود.(Stereology).

۲-۲- روش تصحیح خطای بعد سوم

روشهای زیادی برای رفع یا کاهش خطای بعد سوم پیشنهاد شده که مهم‌ترین آنها ماتریس تبدیل است:

[ماتریس آزاد شدگی تصحیح نشده] × [ماتریس تبدیل] = [ماتریس آزاد شدگی تصحیح شده]

آزاد شدگی تصحیح نشده همان اطلاعات خام به‌دست آمده از مطالعات میکروسکوپی است و آزاد شدگی تصحیح شده، برآورد توزیع آزاد شدگی واقعی نمونه می‌باشد (Touching particles).

۲-۳- چگونگی تعیین آزاد شدگی

هدف از تعیین آزاد شدگی، تهیه اطلاعات کمّی و کیفی از ویژگی دانه‌های کانه‌های ارزشمند است. مراحل زیر در تهیه نمونه دخالت دارند:

۱- ریز نمونه برداری (Subsampling)

۲- دانه بندی

۳- قالب گیری ذرات (Particles mounting)

٤- صیقل کاری

هر مرحله باید به‌طور دقیق انجام شود. آماده‌سازی نادرست ممکن است به نتایجی دور از واقعیت منجر شود .

بررسی درجه‌آزادی در اندازه طبقات مختلف، می‌تواند توزیع آزاد شدگی را بر حسب اندازه ذرات نشان دهد. هنگام تهیه مقطع، به‌دلیل بریده شدن اتفاقی، توزیعی از ابعاد ذرات ایجاد می‌شود. درصورتی که نمونه اولیه دارای یک اندازه معین نباشد، افزون بر اینکه متمایز کردن مقاطع مربوط به هر دامنه ابعادی ناممکن می‌شود، شناخت ذرات کوچک به لحاظ شفافیت و وضوح ذرات درشت دشوار است (شکل ۲).

از آنجایی که ماده قالب‌گیری در زمان تهیه مقطع در اثر حرارت حالت سیالیت پیدا می‌کند، به‌دلیل اختلاف چگالی کانیها، به ویژه کانه‌های ارزشمند فلزی و باطله غیر فلزی، سرعت ته نشینی آنها متفاوت خواهد بود (شکل ۳). برای به دست آوردن یک سطح صیقلی مناسب، باید از ورود حبابهای هوا به درون نمونه تا حد ممکن جلوگیری کرد.

در مطالعات میکروسکوپی، بیشتر اوقات، ذرات منفرد به هم چسبیده‌ای وجود دارد که در محاسبه درجه آزادی اهمیت زیادی دارند، چرا که این ذرات به ظاهر به هم چسبیده (Touchig particles)، در مطالعات میکروسکوپی به اشتباه ذرات قفل شده تشخیص داده می‌شوند (Line Concept or Point Counting , Stereology).

صیقل کاری با کیفیت پایین می‌تواند برجستگی‌هایی بر روی سطح نمونه صیقلی به‌وجود آورد. این روند ممکن است باعث تغییر ظاهر ذرات یا حذف برخی از ویژگیهای ذراتی شود که باید در تحلیل میکروسکوپی مشاهده شوند(Stereology).

۳- مواد، تجهیزات و روش تهیه قرص نمونه

در مجتمع مس سرچشمه، تعیین درجه آزادی بر حسب درصد وزنی به همراه برآورد فراوانی کانه‌های فلزی برای سه نمونه محصول مدار

آسیاهای اولیه (خوراک مدار فلوتاسیون)، باطله نهایی سلولهای فلوتاسیون و کنسانتره نهایی، صورت می‌گیرد که عیار میانگین مس در نمونه‌های گرفته شده از این سه، به ترتیب : ۰/۹۶، ۰/۱٤ و ۳۰ درصد است.

توزیع دانه‌بندی نمونه باطله که در این پروهش مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفت، در جدول ۱ آمده است. از آنجائی که بیش از ۹٦ درصد خوراک به باطله راه می یابد، توزیع دانه‌بندی خوراک و باطله تقریباً یکسان است.

بعد از مخلوط‌سازی کامل نمونه سنگ معدن آسیا شده و پودر قالب‌گیری بکلیت (Bakelite)، نمونه آماده شده در دستگاه تهیه قرص قرار داده می‌شود. دستگاه تهیه قرص، شامل یک سیلندر بوده که از انتهای بالایی قابل بستن بوده و از انتهای پایینی به یک جک هیدرولیکی، برای فشرده کردن نمونه، متصل است (شکل ٤). در واقع، نمونه، در فشار و دمای بالا تهیه می‌شود.

از جمله برتریهای این نوع پخت تحت فشار، رساندن بیشتر ذرات به انتهای پایینی مقطع صیقلی و خارج کردن حبابهاب هواست. دمای لازم برای پخت، از اطراف سیلندر به نمونه انتقال داده می شود، و در مجموع شرایط پخت به صورت زیر خلاصه می‌شود:

فشار = ٤۰۰۰ psi دما = ۳۰۰°F مدت زمان پخت = ۱۰min

گفتنی است که فشار لازم باید در تمام مدت پخت و تا سردشدن کامل نمونه، برای جلوگیری از جدانشینی انتخابی، اعمال شود.

۴- ارائه و تحلیل نتایج

۴-۱- محاسبه درصد وزنی کانه‌های مس دار به روش خطی Line Concept (or Point Counting)

۱) در پایان شمارش خطی میکروسکوپی، مجموع طول ذرات مس‌دار (کلکوپیریت، کلکوسیت و کوولیت) در یک جهت خطی، به دو صورت قفل شده و آزاد، محاسبه می‌شود. در محاسبه درجه آزادی، هر کانهء مس‌دار که به یک کانهء مس‌دار دیگر چسبیده باشد، به صورت ذره آزاد محاسبه می‌شود. این امر بدین دلیل است که در عملیات شناورسازی (فلوتاسیون) ذرات با ارزش کانه‌های مس، رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهند و در صورت مناسب بودن شرایط به کنسانتره راه می‌یابند.

۲) پس از محاسبه درصد حجمی هر کانی (V_i)، وزن هر کانی، چه به‌صورت آزاد و چه به صورت قفل شده، با ضرب کردن وزن مخصوص کانی مربوطه،(ρ_i) در درصد حجمی آن، به دست می‌آید. (جدول ۲).

۳) درصد وزنی هر کانی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W_{M,i} = \frac{V_i \rho_i}{\sum V_i \rho_i} \times 100$$

$W_{M,i}$: درصد وزنی کانی i.

٤) سپس درصد وزنی عنصر مس در کانه‌های مس‌دار ($W_{cu,i}$) با استفاده از فرمول شیمیایی آنها محاسبه می‌گردد. برای مثال، هر ۱۰۰g کانی کلکوپیریت ($FeCuS_2$) دارای ۳٤/۸g عنصر مس است.

$$W_{cu,i} = \frac{G_i W_{M,i}}{100}$$

G_i: درصد وزنی عنصر مس کانی i (مقدار G_i برای کلکوسیت، کوولیت و کلکوپیریت به‌ترتیب ۷۹/۸، ٦٦/۵ و ۳٤/۸ درصد در نظر گرفته شد).

در پایان، فراوانی عنصر مس، به‌ازای هر کانی حاوی مس به دست می‌آید.

۵) توزیع عیار هر کانی (D_i) که همان سهم عنصر مس هر یک از کانه‌ها از کل عیار به‌دست آمده است، محاسبه می‌شود. برای مثال اگر کل عیار محاسبه شده برای عنصر مس، ٤۱/۰۳ درصد و درصد وزنی عنصر مس در کلکوسیت آزاد ۸/۰٦ درصد باشد، توزیع عیار کانی کلکوسیت برابر است با:

$$\frac{8/06}{41/00} \times 100 = 19/65\%$$

٦) درصد وزنی واقعی کانه‌های مس‌دار به روش زیر محاسبه می‌شود:

از آنجا که درصد وزنی محاسبه شده کانه‌های مس‌دار، به دلیل وجود کانه‌های دیگر، واقعی نیست، برای محاسبه درصد وزنی واقعی، از عیار عنصر مس حاصل از تجزیه شیمیایی (G_{Lab}) استفاده می‌شود.

$$W_{True,cu,i} = \frac{G_{Lab} D_i}{100}$$

$W_{True,cu,i}$: درصد وزنی عنصر مس کانی i از عیار کل نمونه. سپس دوباره از فرمول شیمیایی کانی مربوطه، می‌توان به درصد وزنی کانی حاوی مس دست یافت.

$$W_{True,M,i} = \frac{W_{True,cu,i}}{G_i} \times 100$$

$W_{True,M,i}$: درصد وزنی واقعی کانی i.

۴-۲- محاسبه درجه آزادی کانه‌های مس‌دار

درجه آزادی را می‌توان هم بر حسب حجم (L_V) و هم بر حسب درصد وزنی (L_W) کانیها محاسبه کرد.

$$L_V = \frac{\sum V_{F,i}}{\sum [V_{F,i} V_{L,i}]} \times 100$$

$V_{F,i}$: مجموع طول شمارش شده کانی آزاد i ؛ $V_{L,i}$: مجموع طول شمارش شده کانی i به صورت قفل شده.

$$L_W = \frac{\sum W_{M,F,i}}{\sum [W_{M,F,i} W_{M,L,i}]} \times 100$$

$W_{M,L,i}$: درصد وزنی کانی آزاد i؛ $W_{M,F,i}$: درصد وزنی کانی قفل شده i.

برای مثال، در جدول ۲ ، درجه آزادی کلکوپیریت برحسب درصد حجمی و درصد وزنی برابر است با:

$$\frac{۲۹۸/۵}{۲۸۹/۵+۲۱۰}\times ۱۰۰ = ۵۸/۷۰٪$$

$$\frac{۱/۱۷}{۱/۱۷+۰/۸۳}\times ۱۰۰ = ۵۸/۶۹٪$$

۴-۳- تعیین خطای اندازه‌گیری درجه آزادی و تهیه نمونه مناسب

برای تعیین دقیق درجه آزادی کانه‌های ارزشمند، لازم است نمونه نمایانگری از آنها، از نظر تعداد دانه‌ها در مقطع صیقلی، وجود داشته باشد. از سوی دیگر، در بررسی میکروسکوپی، دانه‌ها باید به‌اندازه کافی از هم جدا باشند تا افزون بر ساده‌تر شدن شناسایی آنها از نظر نوع کانی و قفل شدگی، از ایجاد خطای زیاد جلوگیری کرد. به همین دلیل، نسبت وزن نمونه به وزن پودر قالب‌گیری در تعیین درجه آزادی مؤثر است.

برای به‌دست آوردن نسبت وزنی مناسب، ۵ نسبت وزنی نمونه به پودر قالب‌گیری، $\frac{1}{14}$ ، $\frac{2}{13}$ ، $\frac{3}{12}$ ، $\frac{4}{11}$ و $\frac{5}{11}$ برای بررسی تهیه شد که (صورت کسر نمایانگر وزن نمونه و مخرج کسر نشانگر وزن پودر قالب‌گیری است) شایان ذکر است چون از یک نمونه معین قرصهای مختلف تهیه شده، از نظر تئوری درجه آزادی به‌دست آمده باید یکسان باشد و هر گونه تفاوتی به خطای اندازه‌گیری در اثر نامناسب بودن تعداد دانه‌ها بر می‌گردد. برای تعیین خطای تکرارپذیری، از هریک از نسبتهای وزنی دو نمونه تهیه شد. از آنجایی که در مطالعه میکروسکوپی خطای فردی در برآورد درجه آزادی برای کانی کلکوپیریت بین ٤/١ و ٨/٩ درصد، برای کلکوسیت بین ۳/۲ و ۱۱/۲ درصد و برای کوولیت بین ۳/۳ و ۲۱/۳درصد تعیین شده است، این نمونه‌ها تنها توسط یک نفر مشخص مطالعه شد تا از بروز این نوع خطا جلوگیری شود (Banisi et al., 2001).

با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای درجه‌آزادی کانیهای مختلف از راه مطالعه ۱۰ قرص نمونه، انحراف معیار (خطای) این مقادیر به روش معمول و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (شکل ۵):

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})}{n-1}$$

که در آن S: انحراف معیار مقدار درجه‌آزادی (٪)، X_i: درجه آزادی کانی در قرائت i ام و $\bar{X}$: میانگین درجه آزادی برای کانی از n قرائت است.

از سوی دیگر، چون بازای هر نسبت وزنی، دو نمونه تهیه شده بود، انحراف معیار تعیین درجه‌آزادی برای هر نسبت وزنی به روش گفته شده برای شکل ۵ محاسبه شد که نتیجه آن در شکل ٦ آورده شده است.

از بررسی شکل ٦ ملاحظه می‌شود که بالاترین انحراف معیار، متعلق به کانی کوولیت (۲۳/٦۲درصد) و کمترین آن مربوط به کلکوپیریت (۵/۲۲درصد) است. چون هر سه این کانه‌ها، ارزشمند هستند، همه آنها به‌صورت یک فاز با ارزش درنظر گرفته می‌شوند. انحراف معیار تعیین مقادیر درجه آزادی کانه‌های ارزشمند ۵/۹۱درصد به‌دست آمد که با توجه به چیره بودن کانی کلکوپیریت، این رقم نزدیک به مقدار به‌دست آمده برای کانی کلکوپیریت است

در صورتی که تعداد مقطع تهیه شده از یک نمونه زیاد (بیش از ۳۰ مقطع) باشد، توزیع مقادیر درجه آزادی به‌دست آمده برای یک کانی خاص توزیع نرمال خواهد داشت. از آنجائی که فراوانی کلکوپیریت از دیگر کانه‌های ارزشمند بیشتر است، احتمال پدیدار شدن ذرات کلکوپیریت در مقاطع صیقلی بیش از همه بوده و از سوی دیگر کانی کوولیت به‌علت داشتن کمترین احتمال پیدایی، دارای بیشترین انحراف معیار است. این مسئله نشان از وابسته بودن دقت تحلیل درجه آزادی به تعداد ذرات مورد مشاهده دارد.

با به‌کارگیری تحلیل واریانس در سطح اطمینان ۸۰درصد مشخص گردید که بین میانگین درجه آزادی به‌دست آمده از ۵ حالت نسبت وزنی، برای کلکوسیت و کوولیت اختلاف وجود داشته (جدول ۳) ولی برای کلکوپیریت اختلاف معنی‌داری در این سطح اطمینان وجود ندارد.

برای پیدا کردن اختلاف میان میانگین درجه آزادی کلکوسیت از آزمون t (Student, t)در سطح اطمینان ۸۰ درصد استفاده شد. این بررسی نشان داد که نتایج به‌دست آمده از قرص‌های تهیه شده با نسبت $\frac{1}{14}$ ، $\frac{2}{13}$ ، $\frac{2}{13}$ با $\frac{3}{12}$ تفاوتی نداشته ولی بین نسبتهای $\frac{3}{12}$ با $\frac{4}{11}$ و $\frac{4}{11}$ با $\frac{5}{10}$ اختلاف وجود دارد. .

به همین دلیل، برای تعیین درجه‌آزادی کانیهای کلکوپیریت و کلکوسیت، نمونه‌ای با نسبت وزنی $\frac{4}{11}$ که کلکوسیت نسبت به آن حساسیت کمتری نشان داد، مناسب تشخیص داده شد. همچنین مشخص گردید که درجه آزادی کلکوپیریت، در نسبتهای وزنی مختلف در سطح اطمینان ۸۰ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

از آنجائی که همهء نمونه‌های قالب‌گیری شده از یک نوع کانسنگ هستند، می‌توان کلیه شمارش مقاطع ذرات را به‌صورت تجمعی در نظر گرفت و درجه آزادی را بر حسب تعداد ذرات محاسبه کرد (شکل ۷).

اگر مقادیر انحراف معیار درجه آزادی کانه‌های مختلف بر حسب شمارش تجمعی ذرات رسم شود (شکل ۸)، مشخص می‌گردد که بیشترین واریانس متعلق به کوولیت (۷/٦ درصد) و کمترین آن متعلق به کلکوپیریت (۲/۷درصد) است. این مقادیر برای هر سه کانهء با ارزشمند و مجموع کل آنها،کمتر از انحراف معیار کل ۱۰ نمونه (شکل ۵) است.

بررسی شکلهای ۷ و ۹ نشان می‌دهد که دقت برآورد درجه آزادی با تعداد ذرات رابطه مستقیم داشته و برای رسیدن دقت بیشتر، کمترین تعداد ذره‌ای باید مطالعه شود که این تعداد برای کلکوپیریت تقریباً ۵۵۰، برای کلکوسیت ۲۰۰ و برای کوولیت ٤٥ ذره به دست آمد.

درجه آزادی به‌دست آمده برای هر یک از کانه‌های ارزشمند و مجموع آنها پس از مشاهده تعداد معینی مقاطع ذرات، تقریباً ثابت می‌ماند (شکل ۷). انحراف معیار درجه آزادی تعیین شده برای کانه‌های کوولیت، کلکوسیت و کلکوپیریت، در زمانی که بیش از حداقل تعداد مقاطع ذرات مطالعه شود، به‌ترتیب ۰/۸، ۱/۲ و ۰/۹درصد به‌دست آمد (شکل ۹).

از آنجایی که نوسان مقادیر درجه‌آزادی به‌دست آمده پس از مقدار معین (۵۵۰ برای کلکوپیریت) کاهش چشمگیری پیدا می‌کند، در نتیجه انحراف معیارهای به‌دست آمده نیز بسیار کم است.

۵- نتیجه گیری

۱- در اندازه‌گیری درجه آزادی به روش شمارش خطی، خطایی افزون بر خطای بعد سوم وجود دارد.

۲- برای محاسبه میزان آزادشدگی کانسنگ معدن آسیا شده، نسبت وزنی ماده نمونه به پودر قالب‌گیری مهم است. این نسبت وزنی برای محاسبه درجه آزادی کلکوپیریت، تأثیر زیادی ندارد ولی برای کلکوسیت اهمیت دارد. این امر به‌دلیل وجود مقدار زیاد کلکوپیریت نسبت به کلکوسیت در نمونه است.

۳- مطالعات نشان داد که کمترین انحراف معیار (خطا) تعیین درجه‌آزادی کانه‌ها در نمونه‌های متعلق به معدن مس سرچشمه، مربوط به زمانی است که برای تهیه مقطع صیقلی ٤ گرم از نمونه با ۱۱ گرم پودر قالب‌گیری مخلوط شود.

٤- مشخص شد که دقت تعیین درجه آزادی، رابطه مستقیمی با تعداد ذرات بررسی شده دارد. کمترین تعداد ذراتی که باید مطالعه شود، برای کانیهای کلکوپیریت، کلکوسیت و کوولیت به ترتیب ۵۵۰، ۲۰۰ و ٤٥ ذره بدست آمد.

جدول ۱- توزیع دانه بندی باطله سلولهای فلوتاسیون

اندازه (میکرون)	+۷۵	+۵۳	+۴۵	+۳۸	-۳۸
انحراف معیار±درصد وزنی	۱/۴±۲۴/۵	۰/۶±۸/۵	۰/۵±۷/۴	۰/۷±۳/۱	۱/۳±۵۶/۵

جدول ۲- روش محاسبه درصد وزنی کانی‌های حاوی مس

کانی	نوع قرارگیری	کل شمارش میکروسکپی	V_i	$\rho_i^* \times V_i$	$W_{M,i}$	$W_{Cu,i}$	D_i	$W_{True,cu,i}$	$W_{True,M,i}$
کالکوسیت	آزاد	45.0	7.85	43.94	10.10	8.06	19.65	0.19	0.24
	قفل شده	15.5	2.70	15.14	3.48	2.78	6.77	0.06	0.08
کوولیت	آزاد	3.5	0.61	2.87	0.66	0.44	1.07	0.01	0.01
	قفل شده	1.0	0.17	0.82	0.19	0.12	0.30	0.00	0.01
کالکوپیریت	آزاد	298.5	52.05	218.60	50.23	17.39	42.39	0.41	1.17
	قفل شده	210.0	36.62	153.79	35.34	12.24	29.82	0.29	0.83
جمع		573.5	100.00	435.16	100	41.03	100	0.96	2.34
عیار مس سولفوری حاصل از آنالیز شیمیایی کل نمونه (G_{Lab}, %) = 0.96%									

* دانسیته (ρ) کالکوسیت، کوولیت و کالکوپیریت به‌ترتیب ۵/۶، ۴/۷ و ۴/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب در نظر گرفته شده است.

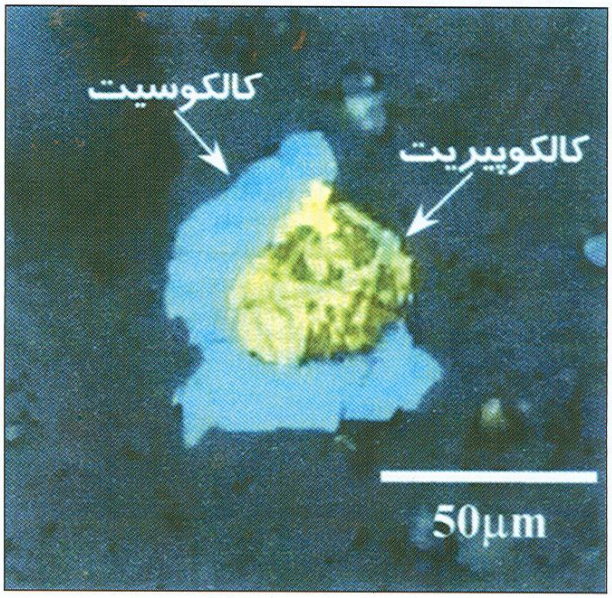
جدول ۳- نتایج تحلیل واریانس برای نتایج به‌دست آمده از تعیین درجه آزادی کلکوسیت و کوولیت

الف) کالکوسیت

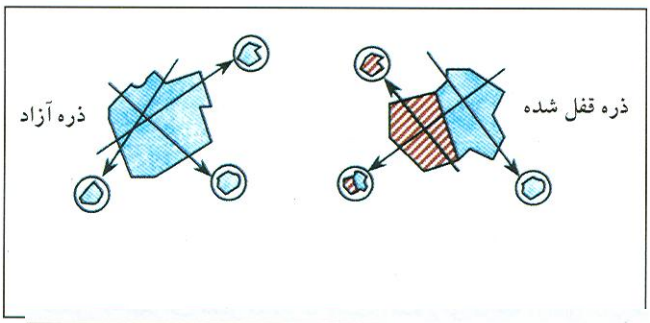
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	652.3	4	163.1	2.6	0.2	2.2
Within Groups	317.5	5	63.5			
Total	969.7	9				

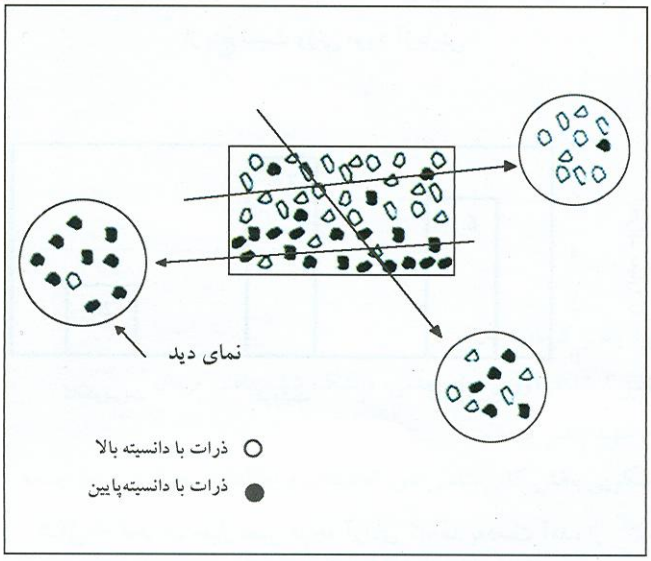
ب) کوولیت

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	3619.5	4	904.9	3.2	0.1	2.2

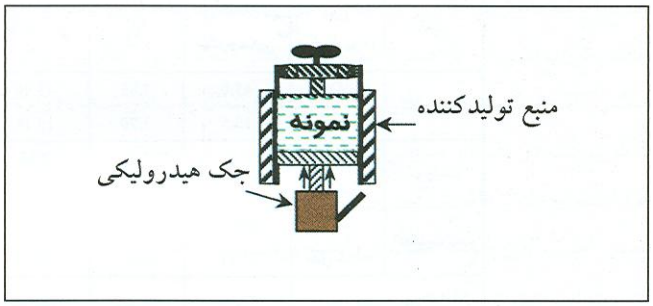


شکل ۲- یک نمای میکروسکوپی برای تعیین درجه آزادی

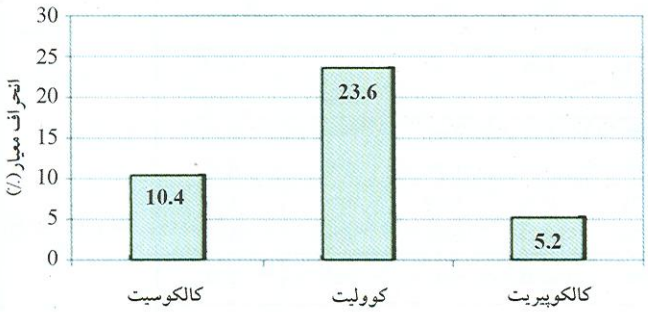




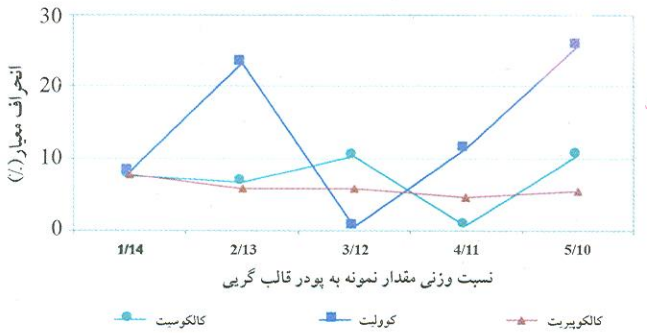
شکل۳- جدایش ذرات در ماده قالب گیری در زمان تهیه مقطع به دلیل اختلاف چگالی آنها [2]



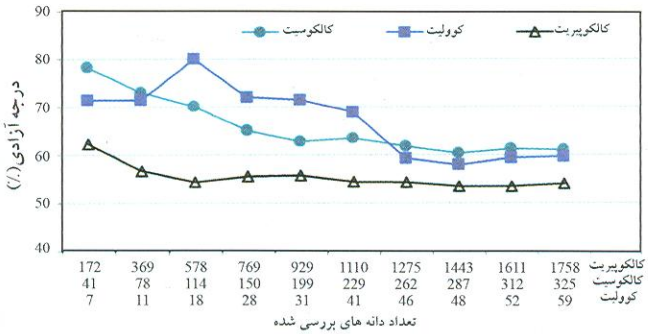
شکل ٤- طرح کلی دستگاه تهیه قرص نمونه



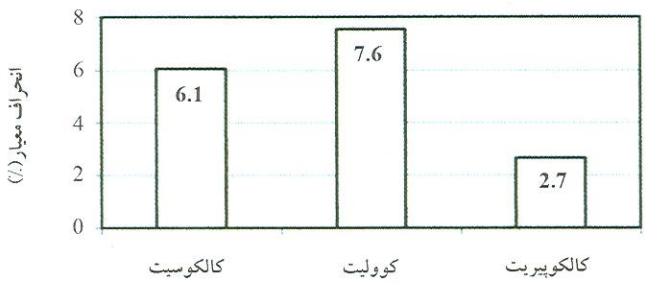
شکل ٥- انحراف معیار تعیین درجه آزادی کانیهای مختلف محاسبه شده از بررسی ۱۰ نمونه



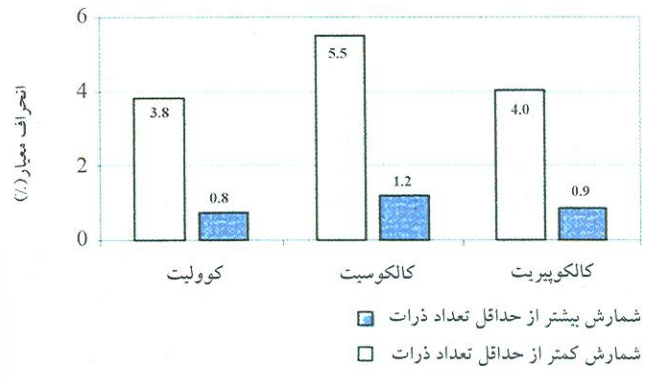
شکل ٦- انحراف معیار مقادیر به دست آمده برای درجه آزادی کانی‌ها از پنج نسبت وزنی مورد آزمایش



شکل ۷- درجه آزادی به دست آمده بر حسب تعداد دانه های بررسی شده



شکل ۸- انحراف معیار تعیین درجه آزادی کانه‌ها، به‌دست آمده از مطالعه کل ذرات



شکل ۹- مقایسه انحراف معیار تعیین درجه آزادی کانی ها با بررسی کمتر و یا بیشتر از حداقل تعداد ذرات معین شده

References

Gaudin, A.M., 1939- Principle of mineral dressing McGraw Hill, 70-78.

Lin, D., 1991- The production of standard material or liberation analysis. M.Eng. Thesis, Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal,98p.

Hollan_Batt, A.B., 1983 - Liberation analysis, Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process Extr. Metall), 92, C129-C132.

Preti, U., Ferrara, G., Meloy, T.P., 1989- Influence of particle shape on liberation. International Journal of Mineral Processing, 25, 17-40,.

Hill, G.S., Rowlands, N., Finch, J.A., 1986- Data correction for two-dimentional studies. Process Mineralogy, 6, B-6, 617-631,

Lin, D., Gomez, C.O., Finch, J.A., 1994 - Test of Barbery's liberation correction procedure, The Institiution of Mining and Metallurgy, 103, C91-C9,.

Petruk, W., Lastra, R., Finch, J.A., , 1996. - Comparison of mineral liberation data obtained by different techniques using image analysis. Proceedings 28th Annual Meeting of the CMP, Ottawa, Canada, 507-522.

Banisi, S., Tajdari, M., Shekarchian, H., 2001- Determination of error of liberation degree analysis at the sarcheshmeh copper mine. Proc, Applied Mineralogy 01, Australia, 26-28,.

* دانشیار دانشگاه شهید باهنر کرمان

** دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

*** استادیار دانشگاه شهید باهنر کرمان

**** مسئول میکروسکوپی بخش کانی‌شناسی امور تحقیقات و مطالعات مجتمع مس سرچشمه

* Associate Professor, Shahid Bahonar University of Kerman

** Graduate Student, Mineral Processing Group, Shahid Bahonar University of Kerman

*** Assistant Professor, Shahid Bahonar University of Kerman

**** Mineralogy Group, R&D Center of Sarcheshmeh Copper Co.