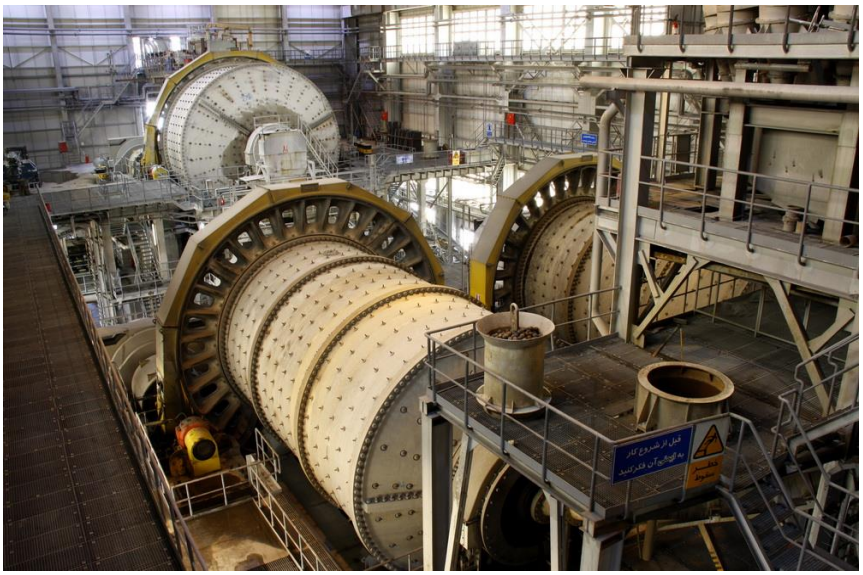
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی معدن

پروژه درس اصول طراحی کارخانه‌های
فرآوری مواد معدنی

# آزمون های متالورژیکی و آزمایشات آن



تهیه و تنظیم
**ابراهیم اسداللهی**
**الهام مرادی**

استاد درس
دکتر حسین کامران حقیقی

آذر ماه ۱۴۰۱

بسم الله الرحمن الرحيم

# فهرست مطالب


۱- مقدمه ..... ۱

۲- خردایش ..... ۱

۲-۱- اندیس‌های کار باند ..... ۲

۲-۲-آزمون‌های‌ارزیابی‌عملیات‌آسیاکنی‌خودشکن‌ونیمه‌خودشکن‌به‌صورت آزمایشگاهی ..... ۴

۲-۳- اندیس خود شکن مک فرسون ..... ۴

۲-۴- آزمون SPI ..... ۵

۲-۵- آزمون بار افتان JK Tech ..... ۵

۳- پایلوت ..... ۸

۴- آسیای غلطکی فشار بالا (HPGR) ..... ۱۰

۵- بازیابی ثقلی طلا ..... ۱۰

۶- فلوتاسیون ..... ۱۱

۶-۱- آزمایشات اولیه و شستشو ثانویه در مقیاس آزمایشگاهی ..... ۱۱

۶-۲- مدار بسته ..... ۱۲

۶-۳- پایلوت ..... ۱۳

۷- کانی‌های سنگین ..... ۱۳

۸- هیدرومتالورژی ..... ۱۴

۸-۱- لیچینگ همزنی ..... ۱۴

۸-۲- لیچینگ ستونی ..... ۱۵

۹- نتایج ..... ۱۷

۱۰- جداول پیوست ..... ۱۸

۱۱- منابع ..... ۲۰

## ۱- مقدمه

فرایندهای زیادی برای پرعیار سازی کانسنگ های معدنی موجود است، اما تنها بخش کوچکی از این فرآیندها برای تغلیظ انواع تیپ کانی شناسی در پروژه‌های اکتشافی امروزی تجاری سازی شده و دارای اهمیت هستند. اکثر فرآیندها، در بخش مربوط به روش‌های فیزیکی و هیدرومتالورژی قرار می‌گیرند. مهم‌ترین اصل در انتخاب نوع فرآیند تشخیص صحیح تیپ کانی شناسی کانسنگ و گانگ همراه آن است. با این حال دانش در این بخش تنها نقطه شروع است. آزمایشاتی برای تعیین اینکه هر نمونه خاص چگونه به یک طرح عملیاتی خاص پاسخ دهند، باید انجام گیرد. کانی‌شناسان به کار گرفته شده توسط زمین‌شناسان اکتشافی معمولاً به اندازه کافی با فرآیند فرآوری کانی‌ها آشنا نیستند تا تمام داده‌های مورد نیاز یک متالورژیست را ارائه دهند. این بخش به بهترین حالت ممکن توسط کانی شناسان فرآیندی[1] قابل انجام است. از آنجایی که محتمل است ذخایر حاوی چند کانی اصلی باشند، ممکن است برای تغلیظ از چندین فرآیند استفاده شود. عموماً، در فرآیندهای جداسازی مواد معدنی و استخراج فلزات از مرحله خردایش به منظور آزادسازی فیزیکی و ایجاد علاقه مندی تجاری و اقتصادی بهره می‌برند.

الزامات نمونه برداری و روش‌هایی که برای خردایش، جداسازی کانی‌ها و آزمایشات بازیابی فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرد در این بخش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این قسمت در نظر گرفته شده است که به محقق و خواننده دید کلی، از رابطه بین حجم های نمونه برداری و هدف(های) آزمایشی که هرنوع نمونه برای آن گرفته شده است، ارائه دهد. روش‌های دقیق آزمایشات را می‌توان در فصل‌های مربوطه در بخش‌های دیگر این کتاب یافت.

## ۲- خردایش

آزمایشات خردایش برای تعیین مقدار انرژی لازم برای آسیاب کانسنگ‌های معدنی و تعیین پیکربندی مدارهای خردایش و طبقه‌بندی مواد ضروری است.

[1] Process Mineralogy

## ۲-۱- اندیس‌های کار باند

بررسی‌های اولیه معمولاً با استفاده از آزمون اندیس کار[1] آسیای گلوله‌ای باند ($Wi_{BM}$) شروع می‌شود. پارامتر اندیس میله‌ای باند ($Wi_{RM}$) قابلیت استفاده برای مواد دانه درشت را دارد که این مهم، باعث افزایش محدوده کاربرد اندیس کار برای دانه بندی‌های مختلف و در نتیجه باعث افزایش انعطاف پذیری آن می‌شود. این پارامترها در ارزیابی پتانسیل تجمع مواد با ابعاد بحرانی[2] در آسیا های AG/SAG و استفاده از مدل‌های مبتنی برای توان برای تعیین میزان توان مصرفی در مدار آسیاهای AG/SAG/Ball کاربرد دارد. این آزمایش‌ها به حداقل ۱۲ الی ۱۵ کیلوگرم نمونه معرف بسته به تعداد دور هایی که برای برقراری تعادل لازم است، نیاز دارد. بررسی مش ها (معمولا دو الی سه بار)، کانی شناسی و درجه آزادی آن‌ها در هر آزمون مورد نیاز است. انتخاب نمونه‌ها باید به طریقی باشد که اجازه عبور مواد بعد از خردایش اولیه برای آزمایشات آسیا میله‌ای از سرند با روزنه ۱۲/۷ میلی‌متر(۰/۵ اینچ) و برای آسیا گلوله‌ای از سرند با روزنه ۳/۳۶ میلی‌متر (۶ مش) داده شود.

توصیه می‌شود ۲۵ تا ۳۰ کیلوگرم نمونه معرف برای هر آزمون در نظر گرفته شود تا امکان تکرار نیز فراهم باشد. برای مطالعات موردی[3] نتایج یک آزمایشگاه به تنهایی کافی است. اگر پروژه در مرحله پیش امکان سنجی قرار داشته باشد، از آزمایشگاه دوم برای تایید نتایج آزمایشگاه اول باید استفاده گردد.

برای مطالعات امکان سنجی دقیق، انجام بررسی‌های اندیس ضربه‌ای باند ($Wi_C$) و ویژگی‌های سایشی یک الزام است. هر آزمون خردایش حداقل به ده قطعه بین ۵۱ میلی‌متر تا ۷۶ میلی‌متر (۲ تا ۳ اینچ) نیاز دارد، اگرچه از بیست قطعه برای تعیین دامنه تغییرات آزمایشات استفاده می‌شود. بخش‌های کوچکی از کل مغزه حفاری برای این آزمون‌ها مناسب هستند. آزمون سایش به حداقل ۱۶۰۰ گرم مواد در ابعاد ۱۳×۱۹ میلی‌متر (۰/۷۵×۰/۵ اینچ) از همان ماده‌ای که برای آزمون خردایش استفاده شد، نیاز دارد. هدف از آزمون سایش، ارائه شاخصی (Ai) است که از آن می‌توان نرخ سایش لاینرهای آسیا و آستر آسیا را تخمین زد. در صورتی که احتمال نرخ ساینده‌گی بالایی وجود داشته باشد و هدف استفاده از آسیای خودشکن باشد، آزمون سایش نیز می‌تواند در محدوده مطالعات گنجانده شود.

[1] Work Index

[2] Critical Sizes

[3] Scoping Studies

نتایج آزمون‌های $Wi_c$، $Wi_{RM}$ و $Wi_{BM}$ را می‌توان به عنوان ورودی مدل‌های طراحی مدار خردایش مبتنی بر توان، که می‌تواند اندازه تجهیزات، قدرت موتور، شرایط عملیاتی در آسیا، سرعت آسیا، توزیع نیرو بین آسیاهای اولیه و آسیاهای ثانویه و ضرورت خردایش یا پیش خردایش به شکل خودشکنی، برای طیف وسیعی از انواع کانسنگ و توان عملیاتی آسیا را مشخص کند، به کار برد.

این چنین بررسی‌ها می‌تواند در غیاب تست پایلوت بسیار موثر و اقتصادی باشد. برای طراحی مدارهای خردایش (بار در گردش سیکلون‌ها، بررسی و تایید اندازه مواد منتقل شده به عنوان بار وردی جدید به آسیای ثانویه، تایید اندازه انتقال به عنوان خوراک جدید به آسیای ثانویه، بازیابی بار های مواد دانه درشت و تاثیرات خردایش مواد دانه درشت و غیره)، با استفاده از روش‌های مبتنی بر توان را می‌توان از نرم افزار JK SimMet جهت شبیه سازی بهره برد و با درصد اطمینان بالای جایگزین آزمایشات پایلوت کرد.

- **پیشینه: آزمون‌های اندیس کار باند**

این رویکرد با موفقیت برای پروژه استحصال ۱۲۰۰۰۰ تنی بر روز معدن مس-طلا گرینفیلد[1] در کشور اندونزی اعمال شد. استاندارد های نمونه برداری با کمترین اختلاط ممکن در محیط، زمان بندی پروژه و تایید مطالعات امکان سنجی تعیین شد. (مک لارن[2] ۲۰۰۱). آزمایشات پایلوت با حجم بالای نمونه گیری عملاً در برنامه مطالعات پروژه امکان پذیر نبود. این به این معنی است، زمانی که مقدار مورد نیاز از نمونه معرف جهت انجام آزمایشات در دسترس نباشد بایستی از مغزه‌ها جهت انجام آزمون‌های خردایش بهره گرفت. نتیجتا، ۵/۱۱ کیلومتر مغزه حفاری که شامل چهارده گمانه از کاواک‌های پنج ساله و ده ساله قسمت PQ و مغزه بخش HQ که در عمق هم پوشانی داشته اند، به دست آمد. اغلب این گمانه‌ها با گمانه‌های تعریف شده منابع NQ یکسان بودند. در نهایت ۱۰۵ بازه بر اساس لیتولوژی و نوع آلتراسیون‌های آن انتخاب شد. از هر بخش برای انجام آزمون‌های خردایش ضربه‌ای، میله‌ای، گلوله‌ای، سایش باند و شاخص بار نقطه‌ای نمونه برداری شد. این اندیس های کار با توجه به عمق معدن و سطوح پله‌های آن تا ۱۰ سال آینده برای بررسی های آسیا، توان عملیاتی و پیش بینی های آن بر اساس یک مدل مبتنی بر توان ترکیب شدند. مواد اضافی باقی مانده از مغزه های نمونه برداری و بررسی های لیتولوژی جهت انجام آزمایشات پایلوت کارخانه فلوتاسیون با آب دریا ترکیب شدند. (بارات[3] ۱۹۹۶).

[1] Greenfields

[2] MacLaren

[3] Barratt

## ۲-۲-آزمون‌های‌ارزیابی‌عملیات‌آسیاکنی‌خودشکن‌ونیمه‌خودشکن‌به‌صورت آزمایشگاهی[1]

روش‌های بسیاری برای ارزیابی عملیات آسیا کنی آسیا های خودشکن و نیمه خودشکن وجود دارد که شامل اندیس کار آسیای خود شکن مک فرسون[2]، آزمون بار افتان[3] JK Tech، آزمون استرالیایی سایش، آزمون پیشرفته بررسی شایستگی واسطه خردایش خودشکن[4] (AMCT) است. اولین مورد بیشتر برای بررسی امکان پذیری عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالی که موارد بعدی ابزار مفیدی در طراحی مدارهای آسیا در مقیاس بزرگ و پیش بینی عملکرد آسیا موجود در هنگام مواجه با کانی های جدید است و آخرین مورد، روش AMCT برای بررسی و مقایسه امکان سنجی بین دو روش آسیا کنی خودشکن و نیمه خودشکن و همچنین انتخاب سایز آسیا بر اساس روش‌های مبتنی بر توان آسیا استفاده می‌شود. اندیس توان آسیا نیمه خودشکن (SPI) برای پیش بینی توان عملیاتی یک نوع کانسنگ در مدار آسیا کنی موجود یا جدید استفاده می شود. نرم افزار شبیه ساز JK Tech در ارزیابی تغییرات مدار پیشنهادی مفید است. به عنوان مثال، افزودن یک سنگ شکن به مدار آسیا نیمه خودشکن-گلوله‌ای[5]، در حالی که آزمون SPI می‌تواند به عنوان یک پارامتر برای بهینه سازی مدار آسیا استفاده شود.

## ۲-۳- اندیس خود شکن مک فرسون

این اندیس کار به وسیله آزمایش ۲۲۵ تا ۲۵۰ کیلوگرم نمونه که شامل مغزه های حفاری، ROM و کانسنگ اولیه خرد شده که باید تحت یک مرحله خردایش قرار گیرند تا به ابعاد ۳۲ میلی‌متر (۱/۲۵اینچ) تا ۴۶۰ میلی‌متر (۱۸ اینچ) برسند، انجام می‌شود. آسیا کنی خشک که در یک مدار بسته با سرند ۱۴ مش و کلاسیفایر هوایی که دارای مزیت شارژ گلوله نیز است، قرار دارد. توان کشی آسیا اندازه گیری و به توان مصرفی در هر تن (kWNt) محصول خالص تبدیل کرد، در نتیجه می‌توان اندیس کار خود شکن (AWi) را محاسبه کرد. اندیس کار مک فرسون کانسنگ ها را به دو دسته تقسیم می‌کند دسته اول کانسگ‌هایی‌اند که با آسیای خودشکن به راحتی قابل خردایش‌اند و دسته دوم کانسنگی که نیاز به شارژ کردن بار خرد کننده دارند.

---

[1] Batch

[2] MacPherson

[3] Drop Weight

[4] Advanced Autogenous Media Competency Test

[5] SAG-Ball Mill Circuit

نتایج آزمون مک فرسون نیاز به تفسیر توسط مشاوران صنعتی شرکت مک فرسون[1] دارد و باید به وسیله آزمون‌های خردایش همچون اندیس کار ضربه‌ای، میله‌ای، گلوله‌ای و آزمون سایش تکمیل شود. آزمون مک فرسون به صورت مستقیم نمی‌تواند صلاحیت یک کانسنگ با ابعاد درشت را در آسیای خود شکن بررسی کند به همین دلیل بیشتر از این آزمون برای آزمایشات قبل از امکان سنجی عملیات استفاده می‌شود.

## ۲-۴- آزمون SPI

این آزمون در یک آسیا استاندارد کوچک که برای مدت زمان مشخص به صورت خشک در حل کار بوده، انجام می‌شود. پس از آن آسیا خالی و مواد به صورت خشک سرند می‌شوند. بار ورودی خردایش شده به ابعاد ۱۲/۷ رسیده و مواد دانه درشت تر تحت عملیات خردایش مجدد قرار می‌گیرد. میزان زمان مورد نیاز بر حسب دقیقه برای خردایش بار اولیه تا اندازه محصول مورد نظر، برای ارتباط دادن ویژگی‌های آسیا یک کانسنگ معدنی خاص با پایگاه داده بزرگی از مواد دیگر استفاده می‌شود، در نتیجه با بهره گرفتن از آن می‌توان عملکرد یک آسیا در حال کار یا جدید را تخمین زد. در برخی از پروژه‌ها، چند صد نمونه مورد آزمایش قرار می‌گیرند و نتایج آن وارد یک مدل بلوکی می‌شود که از آن می‌توان پیش‌بینی‌هایی را در مورد قابلیت توان عملیاتی یک آسیا معین، چه موجود و چه پیشنهادی انجام داد. آزمون SPI به ۲ کیلوگرم نمونه دانه درشت از مغزه حفاری یا خرده سنگ های حاصل از عمیات حفاری RVC نیاز دارد.

## ۲-۵- آزمون بار افتان JK Tech

همانطور که از نام آن پیداست در این آزمون از وزنه های استاندارد استفاده می‌شود که از فاصله استاندارد بر روی نمونه آزمایشی انداخته می‌شوند. در این نوع آزمون قبلا از آزمایش آونگ نیز استفاده می‌شد. البته دوباره نیز می‌توان از آن در شرایطی که محدودیت کمتری نسبت به ابعاد مواد دانه درشت وجود داشته باشد استفاده کرد که در نتیجه آن باعث کاهش تعداد فراکسیون های دانه بندی و سطوح انرژی تحلیلی شد. آزمایش سایش نیز با استفاده از آسیا کوچک و با سرعت کم انجام می‌شود. این آزمون سایش با هدف متفاوت از آزمایش سایش باند است که قبلاً ذکر شد. آزمون بار افتان و سایش، اعداد تابع شکست را تولید می‌کنند که در برنامه JK SimMet برای شبیه‌سازی شرایط مختلف فرآیند در یک مدار سنگ شکنی و برای پیش‌بینی ظرفیت و توان مورد نیاز استفاد می‌شود. بهترین دقت با کالیبره کردن مدل در برابر مدار مشابهی که برای آن داده‌های عملیاتی واقعی در دسترس هستند، به دست می‌آید.

[1] A.R. MacPherson Consultants Ltd.

در حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم نمونه مورد نیاز است. لازم است اطمینان حاصل شود که مواد در درشت ترین سایز خود مخصوصا حداقل ۳ کیلوگرم (۱۰ قطعه) ۶۵×۶۵ میلی‌متر (۲/۵×۲/۵اینچ) و همچین در نهایت نمونه اضافی برای آزمایش های تکراری در دسترس باشد. پنج فراکسیون دانه بندی مورد آزمایش قرار گرفته اند که پایین ترین محدوده آن ۱۴/۳×۱۲/۷ میلی‌متر (۰/۵۶×۰/۵اینچ) است. به علاوه، حداقل ۳ کیلوگرم از نمونه در محدوده ابعادی ۶۵ ×۳۸ میلی‌متر (۲/۵×۱/۵اینچ) برای انجام آزمون سایش لازم است. اگرچه مغزه حفاری با قطر ۶ اینچ توسط نرم افزار JK Tech ترجیح داده می‌شود اما مغزه PQ را نیز می‌تواند به عنوان یک حداقل قطر قابل قبول یا اینکه از ROM استفاده کرد. مغزه معمولاً در یک بار عملیات خردایش خرد می‌شود تا انحرافات[1] سطوح استوانه‌ای به حداقل برسد و اثرات مفید لبه‌های تیز را بر روی نتایج تست به حداکثر برساند. اگر از مغزه های با قطر کوچک استفاده شود ممکن است تعداد فراکسیون موثر دانه بندی کاهش یابد. برای روشی مختصر ارزان‌تر، فراکسیون ۲۲×۱۹ میلی‌متر (۰/۸۷۵×۰/۷۵ اینچ) با استفاده از پنج سطح انرژی به عنوان ابزاری برای آزمایش کانسنگ های مختلف از نظر اقتصادی در معرض شکستگی قرار می‌گیرد. هر یک از این دو روش کاربرد خاص خود را دارند و باید با تفاسیر مختص خود تکمیل شوند، اما به طور کلی توافق شده است که روش JK Tech برای طراحی مدار آسیا بهتر است (حداقل در حال حاضر)، در حالی که رویکرد SPI یک روش اقتصادی برای ارزیابی کانسنگ های مختلف از نظر توان عملیاتی آسیا است.

- **پیشینه: آزمون های JK و SPI**

اخیرا برای یکی از پروژه‌های اصلی تصمیم گرفته شد تا از هر دو آزمون SPI و JK Tech با استفاده از نمونه‌های مشابه، برای یک مطالعه امکان‌سنجی استفاده شود. بخش‌هایی از کل مغزه در فواصل منظم گرفته شد و ابتدا برای تقریبا ۱۵۰ آزمایش به آزمایشگاه مرکزی JK Tech ارسال شد. پس از آزمون های بار افتان و سایش، نمونه‌هایی از بخش‌های مرکزی مشابه برای انجام آزمایش‌ها با استفاده از روش SPI به آزمایشگاه ماینوکس[2] فرستاده شدند. سپس این مواد به مرکز آماده سازی نمونه اکتشافی که در آن تقسیم شده بود، بازگردانده شد. بخشی از نمونه‌ها برای بررسی های بیشتر پودر و بقیه مواد برای تعیین اندیس کار باند به یک ساختمان دیگر فرستاده شد. به این ترتیب نمونه‌ها بیش‌ترین مقدار داده را فراهم کردند. این داده‌ها هر یک به نوبه خود برای کمک به برنامه‌ریزی تاسیسات پایلوت AG/SAG و همچنین برای ارائه یک بررسی در برابر نتایج تاسیسات پایلوت مورد استفاده قرار گرفتند.

[1] Bias

[2] Minnovex

## ۲-۶- آزمون پیشرفته بررسی شایستگی واسطه خردایش خودشکن

AMCT ریشه در سازمان سابق آلیس چالمرز[1] دارد و در حال حاضر توسط امدل[2] در جنوب استرالیا مدیریت می‌شود. مشاوران معدنی شرکت اروی[3] به طور مشترک با امدل به پیشرفت‌های بعدی کمک کردند. این روش شامل تست‌های فردی زیر است که نتایج آن‌ها با استفاده از طراحان مدار آسیاکنی در قابل تفسیر است.

- آزمون استاندارد قابلیت خردایش باند که حدوداً به ۲۰۰ کیلوگرم نمونه در فراکسیون ابعادی زیر نیاز دارد: ۱۵۲×۱۴۰ میلی‌متر (۶ ×۵/۵ اینچ)، ۱۴۰×۱۲۷ میلی‌متر (۵/۵ × ۵ اینچ)، ۱۲۷× ۱۱۴ میلی‌متر (۵×۴/۵ اینچ)، ۱۱۴×۱۰۲ میلی‌متر (۴/۵×۴ اینچ). درصد وزن باقی مانده در هر فراکسیون ابعادی ثبت می‌شود. اگر از مغزه حفاری با حداقل سایز PQ استفاده شود، قطعه مورد نظر را به حداکثر طول ۱۵۰ میلی‌متری برای دانه‌بندی، تقسیم می‌کنند. نمونه در یک استوانه به طول ۱/۸۳ متر (۶ فوت) در ۰/۳ متر(۱ فوت) بارگذاری می‌شود که برای ۵۰۰ بار با سرعت ۲۶ rpm دوران داده می‌شود. توان کشی خالص ثبت و توان مصرفی محاسبه می‌شود. در پایان آزمایش، بار آسیا از ۱۰۲ میلی‌متر (۴ اینچ) تا ۷۵ میکرون اندازه‌گیری می‌شود. تجزیه و تحلیل اندازه محصول و تعداد باقی‌مانده در هر فراکسیون بین ۱۵۲ میلی‌متر و ۱۹ میلی‌متر به سنگ معدن‌های شناخته‌شده قابلیت استفاده در آسیای خودشکن یا آسیای نیمه خودشکن دارد، ارجاع داده می‌شود.
- تعداد بیست قطعه سنگ باقیمانده در هر فراکسیون ابعادی بین ۱۰۲ میلی‌متر (۴ اینچ) و ۱۹ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ) برای مقایسه با نتایج مربوط به فراکسیون های ابعادی معادل روی کانسنگ جدید، تحت آزمون اندیس ضربه‌ای باند (Wic) قرار می‌گیرند. تفاوت‌ها در مقدار این شاخص بین اندازه طبقه‌بندی برای مواد باقی‌مانده می‌تواند نشان‌دهنده صلاحیت در یک اندازه بزرگ‌تر یا در یک "اندازه بحرانی[4]" نسبت به نتایج سنگ معدن تازه و شاخص‌های استاندارد کار باند برای آسیاکردن (میله‌ای و گلوله‌ای) باشد.

[1] Allis Chalmers

[2] Amdel

[3] Orway

[4] Critical Size

- آزمون‌های استاندار قابلیت خردایش باند برای آسیا میله‌ای($Wi_{RM}$) و آسیا گلوله‌ای ($Wi_{BM}$) به یک مش مشخصی از ترکیب مواد به جا مانده و کانسنگ تازه آسیاب شده نیاز دارد. نسبت $Wi_{BM}$:$Wi_{RM}$ در ارزیابی بازده توان مورد انتظار آسیا خودشکن یا نیمه خودشکن، به دنبال خردایش مواد دانه درشت مهم است.
- آزمون سایش استاندارد باند.
- تست‌های استاندارد برای مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و اندیس بار نقطه‌ای (PLI) برای ارجاع به نتایج اندیس بار نقطه‌ای که در فواصل منظم در مغزه حفاری در میدان تعیین شده‌اند. این آزمایش‌ها را می‌توان برای مقایسه بر روی مواد باقی‌مانده و کانسنگ های جدید انجام داد.

در مقایسه با روش‌های مک فرسون، SPI و JK Tech، ارزش بیشتری در هر نمونه با AMCT در طیف وسیعی از فراکسیون‌ها و انواع آزمون‌ها از نظر طیف معیارهای فشرده‌سازی برای هزینه کم‌تر بدست می‌آید. آزمون AMCT، در قالب کامل خود برای تعداد قابل‌توجهی از پروژه‌ها به خصوص برای کانه های طلای کم عیاراسترالیا استفاده شده‌است. از نتایج این آزمون برای ایجاد طرح‌های مبتنی بر توان که به خوبی با داده‌های عملیاتی واقعی و برای طراحی معیارهایی که از آزمایشات پایلوت مقیاس بندی شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (سیدال[1] ۱۹۹۶، بارات[2] ۱۹۹۹).

## ۳- پایلوت

در حالی که برخی از آزمون ها در مقیاس کوچک اطلاعات مناسب AG/SAG را برای هدف‌گذاری و مطالعات امکان‌سنجی ارائه می‌دهند، برخی دیگر داده‌هایی را برای استفاده در روش‌های مبتنی بر توان و شبیه‌سازی برای سایزبندی تجهیزات آسیا و طراحی مدار برای مطالعات امکان‌سنجی دقیق تولید می‌کنند. آزمایشات مقیاس پایلوت هنوز هم برای گنجاندن در یک برنامه مطالعه امکان‌سنجی دقیق توسط بسیاری از کارشناسان طراحی مدار آسیا در شرایط خاص، ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های آزمایش مقیاس پایلوت در ده سال اخیر به میزان قابل توجهی بهبود یافته است و تعداد پیکربندی‌های مدار های مختلف و متغیرهای آسیا که باید مورد بررسی قرار گیرند کاهش یافته است. این نتیجه تجربه بیشتر در عملکرد مدارهای خردایش و همچنین تغییرات متعدد در مدارهایی است که قبلا طراحی شده بودند. به این دلایل، میزان نمونه مورد نیاز و هزینه کار آزمایشی واحد پایلوت هر دو حالت کاهش‌یافته است.

[1] Siddall

[2] Barratt

برای کانسارهای پورفیری مس و مس-طلا، رایج‌ترین مدار خردایش در حال حاضر سنگ‌شکن مخروطی-آسیا نیمه‌خودشکن-آسیای گلوله‌ای-قلوه‌سنگی یا مدار SABC است. مواد خروجی ازآسیای نیمه‌خودشکن سرند و سرریز آن یک یا چند مرحله خردایش و سپس به آسیا نیمه خودشکن برگردانده می‌شود.

یکی از روش‌هایی که اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است، پیش خردایش بخشی از خوراک آسیای نیمه‌خودشکن به اندازه‌ای که از "ابعاد بحرانی" ریزتر باشد ( معمولا محدوده‌ای درحدود ۶۵ تا ۸۹ میلی‌متر (۲/۵ تا ۳/۵ اینچ) است). عملیاتی که توسط آن مواد به اندازه ۱۵۲×۵۱ میلی‌متر (۶ ×۲ اینچ) را از کانسنگ اولیه خرد شده جدا می‌کند و تا عبور از سرند ۳۸ میلی‌متر (۱/۵ اینچ) خرد می‌کند و در نهایت محصول خرد شده را با خوراک SAG مخلوط می‌کند. پیش خردایش ممکن است نرخ تغذیه آسیا را به طور قابل‌توجهی تا حدود ۵۰ ٪ در یک مورد بر روی کانسنگ سخت در مقایسه با عملیات SABC معمولی افزایش دهد. برای آزمایشات در مقیاس پایلوت برای موارد این چنینی باید اطمینان حاصل شود که توزیع دانه بندی مواد نمایندی معرفی از کل مواد مورد آزمایش است. امکانات نسبتا کمی برای آزمایشات پایلوت آسیا AG/SAG وجود دارد. به طور کلی ساخت و راه‌اندازی یک مقیاس پایلوت برای یک شرکت عملیاتی مقرون به صرفه نیست. علاوه بر این، راه اندازی موفقیت آمیز این‌چنین واحد های نیازمند تجربه زیاد است.

- **پیشینه: مغزه حفاری**

حجم زیادی از مواد برای به دست آوردن مقدار مورد نیاز برای آزمایشات در مقیاس پایلوت AG/SAG لازم است. در یک پروژه اخیراً از مغزه حفاری ۱۶۵ میلی‌متر (۶/۵ اینچ) برای تولید ۱۲۰ تن نمونه برای این منظور استفاده شد. برنامه آزمایش شامل دو نوع کانسنگ و چهار مدار اصلی و هزینه در حدود ۱۰۰.۰۰۰ دلار، شامل هزینه حفاری و انتقال نمونه‌ها به محل آزمایشگاه بود. مقدار مواد مورد نیاز برای انجام آزمایشات به نرخ تغذیه آسیا بستگی دارد، که از ۱۸۰ کیلوگرم بر ساعت تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر ساعت (۴۰۰ پوند بر ساعت تا ۷۰۰ پوند بر ساعت) یا بیشتر متغیر است.

نرخ خوراک‌دهی تحت تأثیر سختی کانسنگ، نوع مدار (به‌عنوان مثال، خودشکن یا نیمه‌خودشکن)، مشخصات گلوله‌های شارژشده و خردایش قلوه‌سنگی می‌باشد. از توان خالص مصرفی و نرخ خوراک‌دهی، توان مصرفی ویژه محاسبه شد که معمولاً بر حسب کیلووات ساعت بر تن بیان می‌شود. این یکی از دو پارامتر اصلی است که برای افزایش اندازه آسیا در مقیاس صنعتی استفاده می‌شود. پارامتر دیگر اندازه انتقال مواد از آسیای AG/SAG به آسیای گلوله‌ای است. اندازه انتقال از تجزیه و تحلیل سرند خروجی محصول مدار آسیای AG/SAG بدست می‌آید. آماده‌سازی نمونه به دو هفته زمان نیاز داشت و آزمایش واقعی سه هفته به طول انجامید. دو هفته دیگر برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و گزارش مورد نیاز بود.

هزینه آزمایش کارخانه پایلوت به تعداد انواع کانسنگ و پیکربندی مدارهای مورد بررسی و همچنین محل کارخانه بستگی دارد. هزینه آماده‌سازی نمونه و دفع پسماند قابل توجه است.

## ۴- آسیای غلطکی فشار بالا (HPGR)

آزمایشاتی برای بررسی کاربرد بالقوه آسیا غلطکی فشار بالا (HPGR) معمولاً به صورت رایگان در مقیاس آزمایشگاهی توسط سانده آن انجام می‌شود. اندازه این دستگاه ۰/۱۰ متر (۴/۰ اینچ) قطر در ۰/۰۳ متر (۱/۲ اینچ) عرض یا معمولا ۰/۳۰ متر (۱/۰ فوت) قطر در ۰/۰۷ متر (۲/۷۵ اینچ) عرض می‌باشد. آزمایشات مقیاس پایلوت با استفاده از آسیای با قطر ۰/۷۱ متر (۲/۳۳ فوت) و عرض ۰/۲۱ متر (۸/۲۵ اینچ) معمولاً در سایت عملیاتی یا پایلوتی با آسیای HPGR انجام می‌شود.

آسیا غلطکی فشار بالا (HPGR) در معادن آهنی و غیر آهنی، در آسیاب کیمبرلیت های حاوی الماس قبل از جداسازی فیزیکی، کانسنگ طلا قبل از هیپ لیچینگ و کانسنگ آهن قبل از آسیا گلوله‌ای و با پتانسیل بالای برای کانسنگ مس و طلا کاربرد پیدا کرده‌است. از مزایای بالقوه‌ای آن می‌توان به ایجاد ریزترک در شبکه‌های کریستالی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مراحل پایین دستی خردایش اشاره کرد.

وزن معمولی نمونه‌ها برای یک آسیاب بزرگتر از مقیاس آزمایشگاهی (قطر ۰/۳۰ متر) ۳۵۰ کیلوگرم است، یک سری آزمایشات ۲۵ کیلوگرمی که هر کدام، برای عبور از ابعاد ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) آماده شده اند. آزمایش‌ها در مدار باز با عملیات سیکل بسته معمولا یک گزینه است. اثرات متغیرهایی مانند اندازه مواد دانه درشت خوراک، نیروی آسیاکنی و سرعت دستگاه ارزیابی می‌شود.

## ۵- بازیابی ثقلی طلا

در بسیاری از مدار آسیاب کوچک و بزرگ کارخانجات، طلا و یا سایر فلزات گرنبهایی موجود است که امکان بازیابی آن‌ها، توسط نیروی گریز از مرکز براساس سایز ابعادی و وزن مخصوص آن فراهم می‌شود. در حال حاضر از تغلیظ‌کننده‌های ثقلی گریز از مرکز به عنوان مثال نلسون[1] و فالکون[2] به‌طور گسترده برای این منظور استفاده می‌شود. یک بررسی آزمایشگاهی معمولی به ۳۰ تا ۷۰ کیلوگرم نمونه معدنی نیاز دارد که برای خوراک اولیه آسیای میله‌ای خرد شده‌است (کمتر از ۱۲/۷ میلی‌متر)، وزن آزمایش شده واقعی به عیارهای هِد واقعی و فراکسیون‌های ابعاد ذرات طلا در نمونه بستگی دارد.

[1] Knelson

[2] Falcon

روش (لاپلانت ۲۰۰۰ [1]) برای آزمایش طلای قابل بازیابی (GRG) شامل آسیای نمونه در آسیای میله‌ای تا ۱۰۰٪ اندازه ذرات کمتر از ۸۵۰ میکرون برای بازیابی طلا در مرحله ۱ با استفاده از یک تغلیظ‌کننده ثقلی گریز از مرکز آزمایشگاهی نلسون است. در مرحله ۲، ۲۰ تا ۲۷ کیلوگرم باطله از مرحله ۱ را آسیا کرده و ذراتی با ابعاد ۴۵٪ تا ۶۰٪ ریزتر از ۷۵ میکرون به عنوان خوراک وارد آسیای دوم می‌شود. سپس ۲۰ تا ۲۴ کیلوگرم از باطله مرحله دو تا ۸۰٪ ریزتر از ۷۵ میکرون آسیا شده و وارد مرحله سوم می‌شود. تمام کنسانتره‌ها و نمونه‌های باطله مورد سنجش قرار می‌گیرند. یک تعادل متالورژیکی برای نشان دادن بازیابی مرحله به مرحله و بازیابی تجمعی براساس فراکسیون ابعادی ذرات تا ۲۰ میکرون تولید می‌شود. چنین بازیابی تجمعی به احتمال زیاد از آنچه در مقیاس صنعتی قابل دستیابی است بیشتر خواهد بود زیرا در عمل فقط بخشی از جریان مدار آسیاکنی (معمولاً بار در گردش) پردازش می‌شود.

## ۶- فلوتاسیون

فلوتاسیون رایج‌ترین روش جداسازی فیزیکی مواد معدنی است که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد. فلوتاسیون برای بازیابی مس، سرب، روی، مولیبدن، نیکل، تنگستن، فلزات گرانبها، سنگ آهن، زغال سنگ و بسیاری از مواد دیگر استفاده می‌شود.

### ۶-۱- آزمایشات اولیه و شستشو ثانویه در مقیاس آزمایشگاهی

آزمایسات آسیاکنی و فلوتاسیون در مقیاس آزمایشگاهی تقریباً همزمان انجام می‌شوند، زیرا پاسخ فلوتاسیون به شدت به اندازه ذرات و بررسی پالپ خروجی وابسته است. بررسی های اولیه معمولاً بر روی پسماند های درشت حاصل از مغزه های حفاری یا نمونه برداری کانالی انجام می‌شود. نمونه برداری تصادفی [2]، ترانشه‌های گردش معکوس [3] و حتی پالپ‌های تشخیصی [4] برای بررسی های بیشتر نیز استفاده می‌شود ولی در نهایت اطمینان به نتایج به دست آمده بسیار اندک است.

بررسی های اولیه شناور سازی یک نوع خاص از کانسنگ معدنی را می‌توان با حداقل ۳ کیلوگرم نمونه تعیین کرد. معمولاً می‌توان برای یک کانسنگ ساده با حدود ۱۵ کیلوگرم نمونه، یک رابطه نسبتاً خوب بین آسیا-عیار-بازیابی، برای مطالعات محدوده یا پیش امکان‌سنجی ایجاد کرد.

[1] Laplante 2000

[2] Grab sampling

[3] Reverse Circulation Chips

[4] Assay Pulps

فلوشیت اصلی فرآیندهای آسیا و فلوتاسیون کانسنگ های اینچنینی برای استفاده در مطالعات امکان سنجی و حتی طراحی کارخانه با ۱۰۰ کیلوگرم نمونه معرف نیز می‌توان به اندازه کافی خوب تعریف کرد، در حالی که آزمایشات تنوع کانی شناسی کانسنگ را در نظر نمی‌گیرد. طراحی مدار، اندازه تجهیزات و پشتیبانی از یک مطالعه امکان سنجی برای کانسنگ های که دارای ترکیبات پیچیده کانی شناسی یا چند فلزی هستند به سه تا پنج برابر نمونه معرف نیازمنداند.

در مواردی که تنوع کانسنگ معدنی معمولا به دلیل تفاوت در کانی‌شناسی و آنالیز نمونه‌های معرف از اهمیت زیادی برخودار است، لازم است آزمایشات گسترده‌ای با استفاده از روش فلوتاسیون استاندارد اولیه[1] برای مشخص کردن تنوع کانسار انجام شود. در یکی از پروژه‌های اخیر، تقریباً پنجاه آزمایش قبل از مطالعه اولیه محدوده، پنجاه آزمایش دیگر قبل از پیش امکان‌سنجی، و تعداد مشابهی قبل از مطالعات امکان‌سنجی دقیق انجام شد. با توسعه معدن، آزمایشات فلوتاسیون استاندارد به منظور بررسی تنوع کانسنگ معدنی ادامه خواهد یافت. در اصل باید آزمایشات جامعی برای ارائه اطلاعات آماری متالورژیکی ورودی به مدل بلوکی زمین شناسی انجام شود.

آزمایشات مدار باز داده‌های قابل اعتماد تری بر روی عیار و بازیابی در فلوتاسیون مراحل اولیه ارائه می‌دهند (اکثر مدارهای اولیه فلوتاسیون مدارهای باز هستند). آزمایشات مدار باز مرحله شستشو فلوتاسیون معمولاً می‌توانند عیار نهایی کنسانتره را به خوبی نمایش دهند، اما به دلیل وجود مواد با ارزش درگیر در گانگ ها و بار در گردش ارقام بازیابی پایینی را از خود نشان می‌دهند.

## ۶-۲- مدار بسته

آزمایشات در مدار بسته برای بررسی اعداد بازیابی نهایی قابل اعتماد، نیاز است. این آزمایش‌ها باید تا زمانی که مدار در حالت تعادل قرار می‌گیرد انجام شود و بعد نمونه برداری صورت گیرد. این مرحله معمولاً دارای پنج سیکل یا بیشتر است. حتی آزمایشات مدار بسته طولانی، به دلیل مشکلاتی که اغلب در کنترل اندازه موادی که تحت عملیات خردایش مجدد قرار می‌گیرند، تجربه می‌شود و اعداد و ارقام عیار و بازیابی غیر قابل اعتمادی در مورد محصولات میانی تولید می‌کنند. واحد پایلوت در مقیاس بزرگ و کوچک داده های مناسبی را برای کارخانه فلوتاسیون ارائه می‌دهد.

[1] Standard Rougher Flotation

## ۶-۳- پایلوت

برای ذخایر مس و فلزات گرانبها، تأسیسات پایلوت فلوتاسیون به ندرت از نظر فنی ضروری است، اما ممکن است برای تأمین مالی پروژه، بازاریابی کنسانتره یا آزمایشات هیدرومتالورژی مورد نیاز باشد. توسعه فرآیند برای مدارهای فلوتاسیون را می‌توان به سرعت انجام داد. اگر تعداد کافی نمونه در دسترس باشد، کار های آزمایشگاهی برای مطالعه یک محدوده به راحتی می‌تواند در دو یا سه ماه کامل شود. مطالعات پیش امکان سنجی به چهار تا شش ماه و یک مطالعه امکان سنجی دقیق به کمتر از یک سال زمان نیاز دارد. با این حال، سرعت در دسترس قرار گرفتن مواد از مرحله اکتشاف معمولاً این دوره‌ها را با حاشیه قابل توجهی روبه رو می‌کند.

## ۷- کانی‌های سنگین

بررسی‌ها معمولاً بر روی نمونه‌هایی از شن‌های ساحلی یا رودخانه‌ای انجام می‌شود. متداول‌ترین روش‌های نمونه‌برداری عبارتند از: نمونه برداری تصادفی ، حفاری با مته[1] و نمونه برداری فله‌ای برای به دست آوردن مواد آزمایشی است. خردایش و آسیاکنی معمولا مورد نیاز نیست و بنابراین هیچگونه آزمایشی در این راستا انجام نمی‌شود. عملیات به طور کلی شامل مراحل شستشو و نرمه گیری، پرعیار سازی ثقلی، خشک‌کنی، جداسازی الکترواستاتیک و مغناطیسی است. آزمایشات ثقلی اولیه معمولاً شامل غربالگری‌ها و بررسی توسط مایعات سنگین برای تعیین آنالیز وزن مخصوص و درجه آزادی تعدادی از نمونه‌های چند صد گرمی است. مطالعات کانی شناسی بر روی محصولات آزمایش انجام شد. آزمایشات ثقلی در مقیاس صنعتی با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی یا پایلوت مانند میزها، مارپیچ ها و مخروط ها انجام می‌شود. یکی از مزیت‌های آزمایشات ثقلی امکان ترکیب محصولات آزمایشی بعد از انجام آن در مقایسه با روش های فلوتاسیون و هیدرومتالورژی می‌باشد.کنسانتره روش‌های ثلقی (سنگین ها) معمولا پس از خشک شدن به وسیله روش های الکترواستاتیک تغلیظ می‌شوند. این آزمایش‌ها اغلب در حالی انجام می‌شوند که مواد در اثر خشک شدن هنوز دارای حرارت بالایی هستند، زیرا برخی از مواد مانند روتیل در دماهای بالا واکنش متفاوتی از خود نشان می‌دهد. چندین مرحله جداسازی مغناطیسی به همراه یا بدون انجام روش جداسازی الکترواستاتیکی اضافی معمولاً کار آزمایش را کامل می‌کند. فقط با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی می‌توان به تعادل مناسبی از مواد رسید. با این حال مقیاسی از آزمایشات ممکن است تعیین شود که نیاز به تولید مقدار نسبتاً زیادی کنسانتره نهایی برای بازاریابی نمونه‌ها شود.

[1] Auger Drilling

یک بررسی مناسب از نمونه‌ها در مقیاس پایلوت، می‌تواند اطلاعات مورد نیاز و داده‌های کافی برای سایز بندی تجهیزات و طراحی کارخانه تولید را کند. نمونه‌هایی مورد نیاز برای مقیاس بزرگتر به همان روشی که برای آزمایشات اولیه به دست می‌آید، تهیه می‌شوند. بسته به نسبت غلظت و مقدار کنسانتره مورد نیاز، مقدار نمونه لازم از حدود ۵ تن تا ۲۰ تن متغیر است. تجهیزات در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت و همچنین آزمایشگاه‌هایی با تجهیزات و تخصص لازم برای انجام یک برنامه آزمایشی به آسانی در دسترس هستند.

## ۸- هیدرومتالورژی

انواع مختلفی از فرآیندهای لیچینگ به طور گسترده برای استخراج فلزات گرانبها، مس، نیکل و کبالت و بسیاری از عناصر دیگر از کانسنگ آنها استفاده می‌شود. شرایط لیچینگ و پارامترهای طراحی تا حد زیادی بر اساس نوع کانی شناسی و عیار سنگ، به ویژه در مورد طلا تعیین می‌شود. این مقاله فقط لیچینگ اتمسفری را مورد بحث قرار می‌دهد. در حالی که این فرآیند به طور گسترده برای استخراج مس و فلزات گرانبها استفاده می‌شود. شیمی فرآیند بین این دو عنصر کاملاً متفاوت است، اما از نظر روش‌های نمونه برداری و روش‌های آزمایش تقریباً یکسان هستند.

### ۸-۱- لیچینگ همزنی

آزمون های تشخیصی مانند لیچینگ سیانیدی سرد و گرم و تعدادی از روش‌های مشابه لیچینگ اسیدی یا سولفات آهن کانی‌های مس دار برای ارزیابی پاسخ نسبی نمونه‌ها به روش‌های استاندارد استفاده می‌شوند. این آزمایشات را تقریبا می‌توان بر روی هر ماده‌ای از پالپ های تشخیصی تا نمونه های حجیم اجرا کرد. به طور معمول، انجام این بررسی ها به یک یا دو ساعت زمان نیاز دارد.

مرحله بعدی اغلب آزمایشات لیچینگ، بطری غلتان با استفاده از نمونه های برش‌های RVC ، ذرات درشت از مغزه حفاری یا مواد مشابه است. بطری غلتان یا انواع دیگر آزمایشات لیچینگ همزنی در مقیاس کوچک، برای مطالعات اولیه روی کانسنگ های مس دار به حداقل ۵۰ گرم تا ۱۰۰ گرم، و برای اجرایآن به دوره‌های زمانی از ۴۸ ساعت تا ۷ روز یا بیشتر نیاز دارد. برای کانسنگ طلا دار، ۱ تا ۱/۵ کیلوگرم کانسنگ خردایش شده آزمایش می‌شود. برای کانسنگ‌های غیرمقاوم، تنوع استخراج فلز در سرتاسر منبع از نظر اقتصادی با روش‌های آزمایشی ساده و در مقیاس کوچک ارزیابی می‌شود. در مورد سنگ های مقاوم، روش های آزمایش پیچیده تر است.

آزمایشات لیچینگ همزنی در مقیاس آزمایشگاهی گاهی اوقات بر روی کانسنگ‌های معدنی انجام می‌شود، اما عموماً بر روی کنسانتره‌های فلوتاسیون و ترسم منحنی‌های جذب طلا بر روی کربن فعال در فرآیند CIP/CIL نیز از آن استفاده می‌شود. این آزمایشات از ۲۴ تا ۴۸ ساعت زمان برای اجرا و هر آزمایش به ۲ تا ۵ کیلوگرم نمونه نیاز دارد.

آزمایشات نیمه‌پیوسته در مقیاس بزرگ‌تر، که هر آزمایش شامل دوازده مرحله است، می‌تواند در موقعیت‌هایی که نیاز به دقت فرآیندی است به عنوان مثال خطر رسوب کربن، سینتیک جذب و بارگذاری بر روی کربن، نیز اجرا شود. این آزمایشات به ۳۰ تا ۵۰ کیلوگرم نمونه نیاز دارد.

## ۸-۲- لیچینگ ستونی

برای پروژه‌های هیپ لیچینگ، آزمایشات لیچینگ ستونی در مقیاس کوچک قدم بعدی است. نمونه‌ها با دانه بندی ریز، معمولاً ۶ تا ۱۹ میلی‌متر (۰/۲۵ اینچ تا ۰/۷۵ اینچ) در اغلب ستون‌هایی با قطر ۷۶ میلی‌متر (۳ اینچ) به ارتفاع ۱ متر تا ۱/۵ متر (۳ فوت تا ۵ فوت) تحت عملیات لیچینگ قرار می‌گیرند. ۹ کیلوگرم (۲۰پوند) نمونه، ۴ متر (۱۲ فوت) مغزه HQ نیاز است. این آزمایشات علاوه بر تعیین میزان استخراج و سرعت استخراج فرآیند لیچینگ، هدف بهینه‌سازی متغیرهای آزمایشی (غلظت اسید و آهن یا سیانید یون، نیاز به مرحله تشویه و غیره) را نیز دنبال می‌کند. با پیشرفت کار، دو عامل وارد عمل می‌شوند که اندازه ستون و مقدار نمونه مورد نیاز را کنترل می‌کنند:

- آزمایشات برای مواد در ابعاد دانه بندی درشت نیاز به قطر ستون بزرگتر دارد. قطر ستون باید حداقل ۴ و ترجیحاً ۵ برابر حداکثر اندازه ذرات باشد.
- ستون‌های بلندتر برای به دست آوردن داده‌های عملیاتی‌تر از عیار محلول لیچینگ باردار (PLS)، pH و مصرف اسید یا سیانید استفاده می‌شود. (ارتفاع ستون ایده آل همان هیپ است که در عملیات واقعی استفاده می‌شود. به ندرت در مراحل اولیه پروژه امکان بررسی دارد.)

در نتیجه این دو عامل، نیاز به نمونه سریعاً افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، یک ستون ۱۵۲ میلی‌متری (۶ اینچی) با ارتفاع ۳ متر (۱۰ فوت) به ۹ برابر بیشتر از ستون کوچکتری که قبلا ذکر شد، نیاز به نمونه دارد. ستون‌های کوچک و متوسط معمولاً برای دوره‌های ۴۵ تا ۱۲۰ روزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما ممکن است به مدت یک سال نیز مورد استفاده قرار گیرند. ۳۰ روز دیگر برای راه اندازی و پیاده سازی یک آزمایش لیچینگ ستونی، بررسی عیار و گزارش نتایج مورد نیاز است. هزینه‌ها به اندازه ستون، تعداد دفعات نظارت و مدت زمان آزمایش بستگی دارد. غربالگری و عیارسنجی بر اساس فراکسیون دانه‌بندی برای باقیمانده نمونه‌ها توصیه می‌شود.

برای پروژه‌های هیپ لیچنگ پیشرفته (ROM)، ستون‌های با قطر بزرگ مورد نیاز هستند. یک شرکت معدنی برای این کار از ستون‌های ۱/۸ در ۹ متر (۶ در ۳۰ فوت) استفاده می‌کند. حدود ۶۰ تن نمونه مورد نیاز است. مدت زمان آزمایش معمولاً ۶۹ تا ۱۲۰ روز است، اما می تواند بیش از یک سال نیز ادامه پیدا کند. آزمایشات پر هزینه هستند، معمولاً ۱۰۰ تا ۷۵۰۰۰ دلار در هر آزمایش، بدون احتساب هزینه نمونه برداری برآورد شده است. ستون‌ها را می‌توان به راحتی کنترل و داده‌های قابل اعتمادتری را تولید کرد که برای طراحی عملیات هیپ لیچینگ در مقیاس صنعتی مناسب است. آزمایش‌های هیپ حتی گران‌تر نیز می‌شوند (۴۰۰۰۰۰ دلار به بالا). اجرای چندین آزمایش ستونی با قطر بزرگ به مراتب بهتر و کم هزینه تر از یک یا دو آزمایش هیپ لیچینگ است.

برای پروژه‌های مس، محلول‌ها ممکن است از مواد شیمیایی آزمایشگاهی یا تجاری تهیه شوند یا از محلول رافینیت حاصل از عملیات SX/EW موجود استفاده شود. محلول حاصل از آزمایشات ستونی ممکن است بازیافت شود. اگر بازیافت شود، ابتدا نمونه‌های عیاری گرفته و مس یا فلزات گران‌بها به ترتیب با جذب SX یا کربن حذف می‌شوند و غلظت یون اسید و آهن، یا سیانید و قلیایی بودن قبل از بازیافت محلول تنظیم می‌شوند.

آزمایشات ستونی می‌تواند بر روی همدیگر «انباشته» و ارتفاع هیپ متعدد را شبیه سازی کنند. در این روش یک ستون به صورت دوره‌ای تحت عملیات لیچنگ قرار می‌گیرد، سپس ستون دوم با کانسنگ تازه شروع می‌شود. PLS از ستون جدید اندازه‌گیری و نمونه برداری می‌شود، سپس در بالای ستون اول اعمال می‌شود. پس از یک دوره زمانی اضافی، ستون سوم ممکن است اضافه شود. بدیهی است که انجام این نوع آزمایشات زمان زیادی لازم دارد. ستون‌های آزمایشی همچنین گاهی اوقات برای شبیه‌سازی چرخه‌های لیچینگ متناوب «استراحت» داده می‌شوند. این عمل باعث افزایش بازیابی می‌شود، اما مزیت اصلی آن عیار PLS بالا است. آزمایشات ستونی محلول مورد نیاز فرآیند های پایین دستی تست آزمایشگاهی نیز تست‌های SX یا تست‌های جذب کربن را تولید می‌کند. الکتروونینگ معمولاً می‌تواند بدون آزمایش طراحی شود. برای محدوده مطالعات، تقریباً ۱۰ تا ۲۰ ستون با قطر کوچک مورد نیاز است. مطالعات پیش امکان سنجی معمولاً به حدود ۲۰ آزمایش با ستون قطر کوچک اضافی و ۵ تا ۱۰ آزمایش ستون میانی نیاز دارند. مطالعات امکان‌سنجی دقیق به ۱۰۰ ستون با اندازه کوچک و متوسط نیاز دارد. اگر قرار است لیچینگ در ROM انجام شود، دو تا پنج ستون با قطر بزرگ نیز مورد نیاز است. عواملی که بر این اعداد تأثیر می‌گذارند عبارتند از تغییرات ذخیره و اینکه آیا مطالعه مورد نظر در بانک اطلاعاتی موجود است یا خیر و همچنین به تجربه شرکت انجام دهنده در پروژه‌های مشابه بستگی دارد.

## ۹- نتایج

اکتشاف، نمونه‌برداری، انجام آزمایش و ارزیابی ذخایر معدنی ارتباط تنگاتنگی با یکدیگر دارند. برنامه‌ریزی و هماهنگی هوشمندانه برای ارائه اطلاعات درست در زمان مناسب برای ارزیابی هر چه بهتر پروژه ضروری است. بررسی و آزمایشات متالورژیکی باید در سریع‌ترین زمان ممکن آغاز شود تا چالش‌های اصلی فرآیند شناسایی شود، اما در عین حال باید از پیشرفت‌های سریع اجتناب کرد زیرا ممکن است پروژه هرگز به معدن تبدیل نشود. انتخاب فرآیند تا حدود زیادی تابعی از کانی‌شناسی کانسنگ و باطله همراه آن است، ضمناً انجام آزمایش‌های برای تایید سازگاری یک کانی‌شناسی خاص برای یک فرآیند معین مورد نیاز است. اساساً هر چقدر مقدار هزینه صرف شده برای به دست آوردن نمونه کمتر باشد به همان اندازه برای آزمایشات متالورژیکی مناسب‌تر است. انجام کارهای آزمایشگاهی در زمان بندی مناسب بر روی نمونه‌های معرف جهت ارزیابی کل پروژه مهم و حیاتی است.

ابزارهای جدیدی مانند آزمون SPI، همچنین رویه‌های تست‌زنی در مقیاس آزمایشگاهی که به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای ارزیابی قابلیت خردایش کانسنگ و طراحی مدارهای آسیاب در دسترس هستند. کارخانه‌جات نیمه صنعتی هنوز برای طراحی مدار AG/SAG در شرایط خاص مورد نیاز هستند.

بر ارتباط بین منابع نمونه‌ها و اهدافی که نمونه‌ها برای آن برداشت می‌شوند تاکید شده است. هزینه نسبی آزمون‌های متالورژیکی در مقایسه با هزینه حفاری و نمونه برداری، اغلب پایین است. بنابراین، نویسندگان امیدوارند که جزئیات این مقاله، استفاده عاقلانه و مقرون به صرفه از اکتشافات معدنی / پروژه توسعه دلار به منظور در دسترس قرار دادن نمونه‌ها و حداکثرسازی کیفیت و اطلاعات خروجی از مراحل مختلف پروژه به دست آمده تشویق کند.

# ۱۰- جداول پیوست

| نوع آزمایش | پیشنهادی ROM / نوع مغزه حفاری/ mm | وزن نمونه مورد نیاز(کیلوگرم برای هر آزمایش) | اندازه بزرگترین سایز ذرات برای هر آزمایش (میلی‌متر) | هزینه تقریبی(دلار آمریکا) برای هر آزمایش (بسته به محل آزمایشگاه و واحد پول محلی) |
|---|---|---|---|---|
| **خردایش** | | | | |
| اندیس کار باند (میله‌ای) | PQ/HQ/NQ ۸۵/۶۴/۴۸ | ۱۵-۱۲ | ۱۲/۷ | ۷۵۰ برای هر مش |
| اندیس کار باند (گلوله‌ای) | PQ/HQ/NQ ۸۵/۶۴/۴۸ | ۱۵-۱۲ | ۳/۳۶ | ۷۵۰ برای هر مش |
| اندیس سایش باند | PQ/HQ/NQ ۸۵/۶۴/۴۸ | ۱/۶ | ۱۹×۱۳ | ۳۵۰ |
| اندیس کار باند (ضربه‌ای) | PQ/HQ ۸۵ /۶۴ | ۱۵-۳۰ | ۷۶×۵۱ | ۱۰۰۰-۵۵۰ |
| اندیس توان SAG (SPI) | PQ/HQ/NQ ۸۵/۶۴/۴۸ | ۲ | ۱۲/۷ | ۵۰۰ |
| اندیس خود شکن مک فرسون | PQ/HQ ۸۵ /۶۴ | ۲۵۰-۲۲۵ | ۳۲ | ۶۸۰۰ |
| تست شایستگی واسطه | PQ /۶" /۸" | ۲۰۰ | ۱۵۲×۱۴۰ (چهار فراکسیون) | ۳۰۰۰ |
| خردایش خودشکن | ۸۵ /۱۵۰ /۲۰۰ | | | |
| PLI/UCS/ فرکانس شکست | PQ/HQ/NQ ۸۵/۶۴/۴۸ | فیلد انتخاب شد | ϕ۵۱×۱۵۲ (UCS) | بررسی میدانی |
| بار افتان JK Tech | PQ /۶" ۸۵ /۱۵۰ | ۲۵۰-۲۰۰ | ۶۵×۶۵ (پنج فراکسیون) | ۵۵۰۰ |
| پایلوت AG/SAG | ۶" /۸" ۱۵۰ /۲۰۰ | ۳۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰ | ۲۰۰ | ۳۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰ |
| HPGR | PQ/HQ ۸۵ /۶۴ | ۳۵۰ | ۲۵ | بررسی فروشنده |
| **فلوتاسیون** | | | | |
| رافر | PQ/HQ/NQ ۴۸/۶۴/۸۵ | ۲-۱ | ۳/۳۶ -۱/۶۵ | ۶۰۰-۴۰۰ |
| کلینر(بازیابی مواد دانه ریز) | PQ/HQ/NQ ۴۸/۶۴/۸۵ | ۱۵ | ۳/۳۶ -۱/۶۵ | ۱۰۰۰ |
| سیکل بسته | PQ/HQ/NQ ۴۸/۶۴/۸۵ | ۲۵-۱۵ | ۳/۳۶ -۱/۶۵ | +۲۰۰۰ |
| طراحی مدار | PQ/HQ/NQ ۴۸/۶۴/۸۵ | ۵۰۰-۱۰۰ | ۳/۳۶ -۱/۶۵ | ۷۰۰۰۰-۱۴۰۰۰ |
| آسیاب مواد بسیار ریز (پودر) | کنسانتره | از پایلوت | وابسته به آزمایش N/A | بررسی فروشنده |
| پایلوت | ۶" /۸" ۱۵۰ /۲۰۰ | ۱۰۰۰۰۰-۵۰۰۰۰ | ۳/۳۶ | ۲۵۰۰ در روز |

| نوع آزمایش | پیشنهادی ROM / نوع مغزه حفاری/ mm | وزن نمونه مورد نیاز(کیلوگرم برای هر آزمایش) | اندازه بزرگترین سایز ذرات برای هر آزمایش (میلی‌متر) | هزینه تقریبی(دلار آمریکا) برای هر آزمایش (بسته به محل آزمایشگاه و واحد پول محلی) |
|---|---|---|---|---|
| **آبگیری** | | | | |
| تیکنر کنسانتره یا باطله | از بررسی های آزمایشگاهی | ۱ | وابسته به آزمایش | بررسی فروشنده |
| فیلتر کنسانتره یا باطله | از بررسی های آزمایشگاهی | ۱ | وابسته به آزمایش | بررسی فروشنده |
| **کانی‌های سنگین** | | | | |
| بازیابی ثقلی طلا (GRG) | PQ/HQ/NQ ۴۸/۶۴/۸۵ | ۷۰-۴۰ | ۱۲/۷ | ۱۲۰۰-۱۰۰۰ |
| جدایش به وسیله مایعات سنگین | شن و ماسه ساحلی یا PQ/HQ/NQ ۴۸/۶۴/۸۵ HQ/NQ | ۰/۲ -۰/۱ | دانه بندی از ۸۵۰ میکرون و ریزتر از آن | ۲۵ |
| ثقلی/ مغناطیسی/ الکترواستاتیکی | شن و ماسه ساحلی یا PQ/HQ/NQ ۴۸/۶۴/۸۵ | ۱۰۰-۵۰ | وابسته به کانی شناسی | ۴۰۰ |
| پایلوت | PQ /۶" /۸" ۸۵ /۱۵۰ /۲۰۰ | ۲۰۰۰۰-۵۰۰۰ | وابسته به کانی شناسی | ۲۵۰۰ بر روز |
| **فروشویی** | | | | |
| باطل رول | HQ/NQ ۴۸/۶۴ | ۰/۱ -۰/۰۵ | ۳/۳۶ -۱/۶۵ | ۵۰۰ |
| اختلاط ناپیوسته (CIP/CIL) | HQ/NQ ۴۸/۶۴ | ۵-۲ | ۳/۳۶ -۱/۶۵ | ۵۰۰ |
| نیمه پیوسته (CIP/CIL) | PQ/HQ/NQ ۴۸/۶۴/۸۵ | ۵۰-۳۰ | ۳/۳۶ -۱/۶۵ | ۶۰۰۰-۵۰۰۰ |
| ستون‌های با قطر کوچک | HQ/NQ ۴۸/۶۴ | ۹ | ۱۹-۶ | ۳۰۰۰ |
| ستون‌های با قطر متوسط (متغیر) | HQ/NQ ۴۸/۶۴ | ۸۰ | ۵۱ | ۷۰۰۰ |
| ستون‌های با قطر بزرگ | PQ /۶" /۸" ۸۵ /۱۵۰ /۲۰۰ | ۶۰۰۰۰ | ۲۰۰ | ۱۰۰۰۰۰-۷۵۰۰۰ |

**نکته:** هزینه‌های نشان داده شده در این جدول شامل هیچ‌گونه هزینه‌ای برای تهیه و تحویل نمونه‌ها یا هر گونه تفسیری از نتایج آزمایش نمی‌شود ولی هزینه‌های دفع پسماند کارخانجات پایلوت را در بر می‌گیرد.

## ۱۱- منابع

[1]. Hanks, J.T. 1997. Process Development for Exploration Projects. SME Annual Meeting.
[2]. MacLaren, D., Mitchell, J., Seidel, J., and Lansdown, G. 2001. The Design, Start-up, and Operation of the Batu Hijau Concentrator. Proceedings International Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology 2001, eds. D.J. Barratt, M.J. Allan, and A.L. Mular,IV : 316.
[3]. Barratt, D.J., Matthews, B.D., and deMull, T. 1996. Projection of AG/SAG Mill Sizes, Mill Speeds, Ball Charges, and Throughput Variation from Bond Work Indices. Proceedings International Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology 1996, eds. A.L. Mular, D.J. Barratt, and D.N. Knight, I1: 541.
[4]. Siddall, B., Henderson, G., and Putland, B. 1996. Factors Influencing Sizing of SAG Mills from Drill Core Samples. Proceedings lnternational Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology 1996, eds. A.L. Mular, D.J. Barratt, and D.N. Knight, I1: 463.
[5]. Barratt, D.J., Basic, J., Dunlop, G.A., and Phillips, R. 1999. Autogenous and Semi-Autogenous Grinding: Laboratory and Pilot Plant Studies. Mineral Processing and Hydrometallurgy Plant Design, World's Best Practice. Australian Mineral Foundation. July.
[6]. Laplante, A.R., Woodcock, F., and Huang, L. 2000. Laboratory Procedure to Characterize Gravity- Recoverable Gold. Transactions, Vol. 308. SME-AIME.