

جمهوری اسلامی ایران

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

ضوابط انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی در مقیاس‌های آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ

نشریه شماره ۵۴۴

وزارت صنایع و معادن

معاونت امور معادن و صنایع معدنی

دفتر نظارت و بهره‌برداری معادن

<http://www.mim.gov.ir>

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

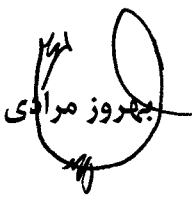
nezamfanni.ir



بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

شماره:	۱۰۰/۳۲۵۱۷	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ:	۱۳۹۱/۴/۲۵	
موضوع: ضوابط انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی در مقیاس‌های آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ		
<p>به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی - مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۴۴ امور نظام فنی، با عنوان «ضوابط انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی در مقیاس‌های آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.</p> <p>رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی، در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۱/۹/۱ اجباری است.</p> <p style="text-align: center;"> بهروز مرادی</p>		

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی

مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
 - ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
 - ۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
 - ۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.
- کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی‌علیشاه، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت

راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

Email: info@nezamfanni.ir

web: <http://nezamfanni.ir>

بسمه تعالی

پیشگفتار

نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت ۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات وزیران) به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تاکید جدی قرار داده است و این دفتر به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و نظام فنی اجرایی کشور وظیفه تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای فنی طرح‌های توسعه‌ای کشور را به عهده دارد. آزمایش‌های کانه‌آرایی با هدف طراحی و توسعه فرآیند فرآوری و یا بازیابی کانی‌های مورد نظر از کانسنگ در مقیاس‌های آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ انجام می‌گیرد. در این آزمایش‌ها بررسی‌های اولیه تکمیل شده و نهایتاً اطلاعات و داده‌های کامل مهندسی برای طراحی و اجرای کارخانه‌های کانه‌آرایی و فرآوری در مقیاس صنعتی فراهم می‌شود. در صورتی که داده‌های دقیق فیزیکی و شیمیایی موجود باشند و همچنین با توجه به بررسی‌های اقتصادی مقدماتی، اطلاعات و ارزیابی دقیق‌تری لازم باشد، آزمایش‌ها در مقیاس پایه و پیشاهنگ انجام می‌شوند.

در راستای اهداف وزارت صنایع و معادن و در چهارچوب برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن، نشریه «ضوابط انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی در مقیاس‌های آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ» با هدف ارایه ضوابط و معیارهای مورد نیاز در انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی تهیه شده است.

این نشریه ضوابط انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی را در مقیاس‌های آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ بیان می‌کند. اسناد و مدارک لازم برای انجام آزمایش‌ها و فهرست عناوین اصلی در گزارش‌های مقیاس‌های مختلف نیز از دیگر موارد ذکر شده در این نشریه است. با همه‌ی تلاش انجام شده قطعاً هنوز کاستی‌هایی در متن موجود است که این‌شاء... کاربرد عملی و در سطح وسیع این نشریه توسط مهندسان موجبات شناسایی و برطرف نمودن آن‌ها را فراهم خواهد نمود. در پایان، از تلاش و جدیت جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان امور نظام فنی همچنین جناب آقای مهندس وجیه... جعفری مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی بخش معدن کشور در وزارت صنایع و معادن، کارشناسان دفتر نظارت و بهره‌برداری معادن و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید. امید است شاهد توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران در خدمت به مردم شریف ایران اسلامی باشیم.

معاون نظارت راهبردی

مهر ۱۳۹۰

هیأت اجرا و کنترل

مجری طرح

مدیر کل دفتر نظارت و بهره‌برداری وزارت صنایع و معادن آقای وجیهه... جعفری

اعضای شورای عالی

دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	آقای مهدی ایران‌نژاد
کارشناس مهندسی معدن	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	آقای بهروز برنا
کارشناس مهندسی معدن	وزارت صنایع و معادن	آقای وجیهه... جعفری
کارشناس ارشد زمین‌شناسی	معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	آقای عبدالعلی حقیقی
کارشناس ارشد زمین‌شناسی	وزارت صنایع و معادن	آقای عبدالرسول زارعی
کارشناس ارشد مهندسی معدن	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	آقای ناصر عابدیان
کارشناس ارشد مهندسی معدن	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	آقای حسن مدنی
کارشناس ارشد مهندسی معدن	سازمان نظام مهندسی معدن	آقای هرمز ناصرینیا

اعضای کارگروه فرآوری

کارشناس ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	آقای احمد امینی
کارشناس ارشد زمین‌شناسی	معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	آقای عبدالعلی حقیقی
دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	آقای بهرام رضایی
دکترای مهندسی متالورژی	دانشگاه تهران	سرکار خانم فرشته رشچی

اعضای کارگروه تنظیم و تدوین

دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	آقای مهدی ایران‌نژاد
کارشناس ارشد زمین‌شناسی	وزارت صنایع و معادن	آقای عبدالرسول زارعی
دکترای مهندسی مکانیک سنگ	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	آقای مصطفی شریف‌زاده
کارشناس ارشد مهندسی معدن	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	آقای حسن مدنی
دکترای زمین‌شناسی اقتصادی	دانشگاه تربیت معلم	آقای بهزاد مهرابی

اعضای گروه هدایت و راهبری پروژه

رئیس گروه امور نظام فنی	خانم فرزانه آقارمضانعلی
کارشناس عمران امور نظام فنی	آقای علیرضا فلسفی

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول - کلیات

۳-۱-۱	آشنایی	۳
۳-۲-۱	اهداف	۳
۳-۳-۱	آماده‌سازی، نمونه‌برداری و تجزیه نمونه	۳
۳-۳-۱-۱	نمونه‌برداری	۴
۳-۳-۱-۲	آماده‌سازی نمونه	۵
۳-۳-۱-۳	تجزیه شیمیایی نمونه	۵
۳-۴-۱	طبقه‌بندی آزمایش‌های فرآوری بر اساس نوع عملیات	۵
۳-۴-۱-۱	روش‌های فیزیکی	۶
۳-۴-۱-۲	روش‌های شیمیایی	۶
۳-۵-۱	آزمایش‌های فرآوری در مقیاس‌های مختلف	۶
۳-۵-۱-۱	مطالعات فرآوری در مقیاس آزمایشگاهی	۶
۳-۵-۱-۲	مطالعات فرآوری در مقیاس پایه	۸
۳-۵-۱-۳	مطالعات فرآوری در مقیاس پیشاهنگ	۸

فصل دوم - آزمایش‌های مقدماتی

۲-۱-۲	عوامل موثر در شناسایی مواد معدنی	۱۳
۲-۱-۱-۲	عوامل ظاهری و فیزیکی	۱۳
۲-۱-۲-۲	عوامل موثر در شناسایی دستگاهی	۱۳
۲-۲-۲	شرایط آزمایشگاه و امکانات مورد نیاز	۱۳
۲-۳-۲	خصوصیات فرد یا گروه آزمایش‌کننده	۱۴
۲-۴-۲	مراحل انجام مطالعات شناسایی	۱۵
۲-۴-۱-۲	قبل از فرآوری	۱۵
۲-۴-۲-۲	حین یا پس از فرآوری (محصولات مختلف فرآوری)	۱۵
۲-۵-۲	آماده‌سازی نمونه برای مطالعات کانی‌شناسی	۱۵
۲-۵-۱-۲	تهیه مقطع نازک	۱۵
۲-۵-۲-۲	تهیه مقاطع صیقلی	۱۶
۲-۵-۳-۲	تهیه نمونه برای مطالعه پراش اشعه ایکس (XRD)	۱۶
۲-۶-۲	مطالعات درجه آزادی	۱۷

- ۱۷-۶-۲-۱- مراحل انجام مطالعات درجه آزادی
- ۱۷-۶-۲-۲- مشخصات نمونه‌ها
- ۱۷-۶-۲-۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

فصل سوم - مقیاس آزمایشگاهی

- ۲۱-۳-۱- مشخصات نمونه‌ها
- ۲۱-۳-۱-۱- وزن نمونه‌ها
- ۲۲-۳-۱-۲- خصوصیات کمی و کیفی نمونه
- ۲۳-۳-۱-۳- شرایط آزمایشگاه و امکانات مورد نیاز
- ۲۶-۳-۱-۴- خصوصیات فرد یا گروه آزمایش‌کننده
- ۲۶-۳-۱-۵- اسناد، مدارک، نقشه‌ها و گزارش‌های مورد نیاز
- ۲۷-۳-۱-۶- فهرست و عناوین اصلی ارایه نتایج و جداول آزمایش‌های فرآوری

فصل چهارم - مقیاس پایه

- ۳۱-۴-۱- مشخصات کلی مقیاس پایه
- ۳۱-۴-۱-۱- برآورد نتایج آزمایش‌های مدار بسته
- ۳۱-۴-۱-۲- محدودیت‌های مقیاس پایه
- ۳۲-۴-۲- مشخصات کمی و کیفی نمونه‌ها
- ۳۲-۴-۳- شرایط آزمایشگاه برای مقیاس پایه
- ۳۲-۴-۴- خصوصیات فرد یا گروه آزمایش‌کننده
- ۳۳-۴-۵- اسناد و مدارک، نقشه‌ها و گزارش‌های مورد نیاز در مقیاس پایه
- ۳۳-۴-۶- فهرست و عناوین اصلی ارایه نتایج و جداول آزمایش‌های کانه‌آرایی در مقیاس پایه

فصل پنجم - مقیاس پیشاهنگ

- ۳۹-۵-۱- مشخصات کمی و کیفی نمونه‌ها
- ۳۹-۵-۱-۱- فلوتاسیون
- ۳۹-۵-۱-۲- فروشویی
- ۳۹-۵-۲- شرایط و امکانات مورد نیاز مرحله پیشاهنگ
- ۳۹-۵-۱-۲- واحد پیشاهنگ
- ۴۰-۵-۲- ظرفیت واحدهای پیشاهنگ
- ۴۰-۵-۳- تجهیزات واحد پیشاهنگ
- ۴۱-۵-۳- خصوصیات فرد یا گروه آزمایش‌کننده
- ۴۲-۵-۴- اسناد و مدارک، نقشه‌ها و گزارش‌های مورد نیاز مطالعات واحد پیشاهنگ

۵-۵- فهرست و عناوین اصلی ارایه نتایج و جداول بررسی‌های فرآوری در مقیاس واحد پیشاهنگ...۴۲

فصل ششم - آزمایش‌ها در مقیاس‌های مختلف

- ۱-۶- آزمون‌های آزمایشگاهی و پیشاهنگ برای طراحی مدار خردایش ۴۷
- ۱-۱-۶- ضوابط آزمون‌های مقیاس آزمایشگاهی ۴۷
- ۲-۱-۶- ضوابط انجام آزمایش‌های واحد پیشاهنگ ۴۷
- ۲-۶- دانه‌بندی ۴۸
- ۱-۲-۶- آزمون‌های سرندکردن در مقیاس واحد پیشاهنگ ۴۹
- ۲-۲-۶- انواع سرندها ۵۰
- ۳-۶- کلاسیفایرها (طبقه‌بندی‌کننده‌ها) ۵۱
- ۱-۳-۶- آزمون‌های طبقه‌بندی در مقیاس واحد پیشاهنگ ۵۱
- ۴-۶- جدایش ثقیلی ۵۳
- ۵-۶- جدایش مغناطیسی و الکتروستاتیکی ۵۵
- ۱-۵-۶- جدایش مغناطیسی ۵۶
- ۲-۵-۶- جدایش الکتروستاتیکی ۵۸
- ۶-۶- فلوتاسیون ۵۹
- ۷-۶- طراحی مدار انحلال و آزمون‌های پایه و واحد پیشاهنگ ۶۰
- ۱-۷-۶- نمونه لازم برای فاز آزمون‌های متالورژیکی ۶۰
- ۲-۷-۶- آزمون‌های متالورژیکی برای ارزیابی انحلال توده‌ای ۶۰

فصل هفتم - آب‌گیری، خشک کردن و انباشت باطله

- ۱-۷- آب‌گیری و جدایش جامد-مایع ۷۱
- ۲-۷- طراحی تیکنرها ۷۲
- ۳-۷- مطالعات فیلتراسیون ۷۳
- ۴-۷- خشک کردن ۷۳
- ۵-۷- انباشت باطله ۷۳
- ۶-۷- ملاحظات زیست‌محیطی در طراحی سدهای باطله ۷۴

فصل ۱

کلیات

۱-۱- آشنایی

در طراحی کارخانه‌های فرآوری^۱ مواد معدنی، موارد مختلفی باید بررسی شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: انتخاب روش مناسب فرآوری، طراحی شمای عملیات، محاسبه موازنه جرمی و در نهایت انتخاب تجهیزات فرآوری. برای انتخاب روش مناسب فرآوری یک ماده مشخص، ابتدا باید خواص فیزیکی و شیمیایی کانسنگ بررسی شود و سپس آزمایش‌های فرآوری بر روی آن انجام گیرد و در نهایت یک یا چند مسیر فرآوری برای فرآوری ماده معدنی انتخاب شود. سپس بر اساس ترتیب قرارگیری این عملیات و دستگاه‌ها شمای عملیات فرآوری رسم می‌شود. بعد از رسم شمای عملیات، کیفیت و کمیت جریان مواد در مسیرهای مختلف محاسبه شده و بر اساس آن موازنه جرمی جامد و آب تعیین می‌شود. اساس محاسبات موازنه جرم، قانون بقای جرم است. با مشخص شدن شمای عملیات و موازنه جرم می‌توان تجهیزات مورد نیاز را انتخاب کرد. در انتخاب تجهیزات عواملی همچون دانه‌بندی، عیار، ظرفیت، سینتیک عملیات و نظایر آن ملاک عمل قرار می‌گیرد، که در این نشریه به آن‌ها پرداخته شده است.

۱-۲- اهداف

آزمایش‌های کانه‌آرایی با هدف طراحی یا توسعه فرآیند فرآوری و یا بازیابی کانی‌های مورد نظر از کانسنگ در مقیاس‌های آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ انجام می‌گیرد. در این آزمایش‌ها بررسی‌های اولیه تکمیل و نهایتاً اطلاعات و داده‌های کامل مهندسی برای طراحی و اجرای یک کارخانه کانه‌آرایی در مقیاس صنعتی فراهم می‌شود. آزمایش‌های کانه‌آرایی در مقیاس آزمایشگاهی اطلاعات دقیقی از ویژگی‌های نمونه و رفتار آن تحت شرایط کنترل شده و مشخص را در اختیار قرار می‌دهد. در صورتی که داده‌های دقیق فیزیکی و شیمیایی در اختیار بوده و همچنین با توجه به بررسی‌های اقتصادی مقدماتی، اطلاعات و ارزیابی دقیق‌تری لازم باشد، آزمایش‌ها در مقیاس پایه و یا در صورت نیاز در مقیاس پیشاهنگ (پایلوت) انجام می‌شود. این آزمایش‌ها به منظور برآورد اهداف زیر انجام می‌شوند:

- بررسی رفتار نمونه تحت شرایط فیزیکی و شیمیایی مشخص؛

- بررسی فنی و اقتصادی برای دستیابی به کنسانتره یا تعیین روش فرآوری مناسب؛

- نهایی کردن طرح کارخانه.

تبدیل مقیاس از آزمایشگاهی به پیشاهنگ باعث افزایش اطلاعات و گستردگی کار می‌شود. انجام آزمایش‌های نظام‌دار متناسب با توسعه فرآیند باعث کاهش ریسک فنی و اقتصادی می‌شود.

۱-۳- آماده‌سازی، نمونه‌برداری و تجزیه نمونه

نمونه‌برداری اولین مرحله شناسایی یک ماده معدنی است. نمونه گرفته شده باید بیشترین تطابق را با کل ماده معدنی داشته باشد. نمونه‌برداری باید با دقت زیاد و توسط شخص با تجربه انجام گیرد. همچنین برای کسب نتایج بهتر باید بین بخش‌های مختلف

عملیات معدنی از جمله اکتشاف، استخراج و فرآوری همکاری و تبادل نظر نزدیکی وجود داشته باشد تا بتوانند از اطلاعات یکدیگر استفاده کنند.

در هر کارخانه فرآوری فرآیند باید انعطاف‌پذیر بوده و کاملاً تعریف شده باشد تا یک سیستم کنترل فرآیند خودکار بتواند بازایی اقتصادی را به طور مداوم بهینه کند. از آنجا که این هدف به علت وجود متغیرهایی که در زیر اشاره خواهد شد، مشکل است لذا باید به طور مداوم کنترل انجام گیرد.

- ناهمگنی کانسار؛
- تغییرات ناحیه‌ای؛
- تغییرات مشخصات خوراک؛
- تغییر کارایی تجهیزات فرآوری در طول زمان؛
- تغییرات فصلی و یا دیگر تغییرات تاثیرگذار بر شرایط فرآوری مانند کیفیت آب، دما و نظایر آن؛
- تغییرات درخواست بازار از نظر کیفیت محصول یا محصولات جانبی؛
- پیشرفت‌های فناوری در روش‌های فرآوری یا تجهیزات مورد استفاده؛
- تغییر معیارهای زیست‌محیطی؛
- عوامل پشتیبانی؛
- سرمایه‌گذاری اولیه؛
- هزینه‌های جاری.

۱-۳-۱- نمونه‌برداری

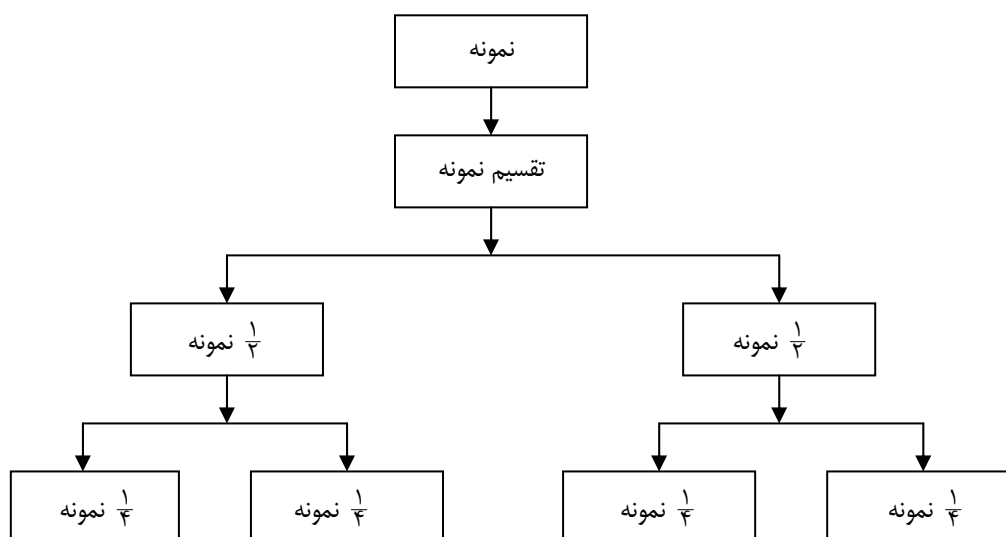
نمونه‌برداری به روش‌های زیر انجام می‌گیرد:

- نمونه‌برداری دستی؛
- نمونه‌برداری از سیالات حفاری؛
- نمونه‌های مغزه‌های حفاری^۲؛
- نمونه‌برداری به کمک مته‌های ماریپیچ (اگر)؛
- نمونه‌برداری شیری؛
- نمونه‌برداری کلی؛
- نمونه‌برداری از ترانسه.

یکی از مسایل مهم در نمونه‌برداری تعیین حداقل وزن نمونه لازم است. به این منظور روابط و تئوری‌های زیادی توسعه داده شده است.

۱-۳-۲- آماده‌سازی نمونه

پس از نمونه‌برداری و انتقال آن به محل مناسب، به منظور تهیه نمونه‌های همگن، نمونه‌ها آماده‌سازی می‌شود. آماده‌سازی نمونه شامل عملیات سنگ‌شکنی، نمایش و تقسیم نمونه است. شکل (۱-۱) روش تقسیم نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ تقسیم نمونه به چهار قسمت

۱-۳-۳- تجزیه شیمیایی نمونه

تجزیه کامل یک نمونه و تعیین عیار عناصر موجود در آن، از نظر طراحی شمای عملیات بسیار اهمیت دارد. بر اساس نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی کامل نمونه‌ها، می‌توان موارد زیر را مورد بررسی قرار داد:

- عیار عنصر یا عناصر مورد نظر؛
- عناصر مضر یا مفید موجود در نمونه؛
- تشخیص اولیه نوع باطله؛
- میزان قابلیت انحلال عناصر کانسنگ؛
- تشخیص عنصر یا عناصر با ارزشی که به عنوان محصول فرعی بتوان شمای عملیات مستقلی را جهت بازیابی آن طراحی کرد (وجود درصد قابل توجهی طلا یا مولیبدن در کانسنگ‌های مس پورفیری).

۱-۴- طبقه‌بندی آزمایش‌های فرآوری بر اساس نوع عملیات

اصولا آزمایش‌های فرآوری به دو گروه فیزیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱-۴-۱- روش‌های فیزیکی

روش‌های فیزیکی مبتنی بر روش‌هایی هستند که بدون ایجاد تغییر در ماهیت و ترکیب شیمیایی ماده معدنی انجام می‌شوند. روش‌های فیزیکی نسبت به روش‌های شیمیایی تنوع بیشتری دارند و طیف وسیعی از آزمون‌های گوناگون و تجهیزات متنوع را به خود اختصاص داده‌اند. انواع روش‌های فیزیکی عبارتند از:

- خردایش و دانه‌بندی؛
- جدایش به روش ثقلی؛
- جدایش به روش مغناطیسی و الکترواستاتیکی.

۱-۴-۲- روش‌های شیمیایی

در این روش‌ها با استفاده از واکنش‌های شیمیایی، ترکیبات مولکولی تغییر پیدا می‌کنند و عناصر مطلوب استحصال می‌شوند، مانند:

- هیدرومتالورژی (شامل فروشویی، سیانوراسیون و نظایر آن‌ها)؛
- پیرومتالورژی؛
- الکترومتالورژی.

۱-۵-۱- آزمایش‌های فرآوری در مقیاس‌های مختلف

در اجرای مطالعات فرآوری، رویکرد سیستماتیک و گام به گام ضروری است. روش کار به ترتیب زیر است:

- الف- مطالعات مقدماتی آزمایشگاهی؛
- ب- مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس پایه؛
- پ- مطالعات در مقیاس نیمه‌صنعتی (پیشاهنگ)؛
- ت- مطالعات در مقیاس صنعتی.

لازم به توضیح است که در کلیه فرآیندها بر حسب مورد مطالعه، انجام بعضی از مراحل ممکن است مورد نیاز نباشد.

۱-۵-۱-۱- مطالعات فرآوری در مقیاس آزمایشگاهی

اولین مرحله در بررسی‌های مقدماتی در فرآیندهای فرآوری مطالعات آزمایشگاهی است. آزمایش‌های فرآوری نه تنها بر روی شمای عملیات کارخانه، بلکه در تمامی مراحل از جمله انتخاب تجهیزات، تعیین نوع و میزان مواد شیمیایی مورد استفاده و بسیاری از پارامترهای دیگر نقش به‌سزایی دارد. انجام مراحل بعدی نیز که شامل واحد پیشاهنگ و صنعتی است بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. در پاره‌ای موارد که امکان انجام مطالعات واحد پیشاهنگ وجود ندارد، اهمیت و حساسیت مطالعات

آزمایشگاهی بیشتر می‌شود. پارامترهایی که در مرحله آزمایشگاهی باید بررسی شوند، متعدد هستند که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است:

- نمونه برداری؛
- آماده‌سازی نمونه؛
- تجزیه شیمیایی؛
- مطالعات کانی‌شناسی و میکروسکوپی؛
- دانه‌بندی و بررسی توزیع ابعادی؛
- تعیین درجه آزادی؛
- خواص سنجی؛
- آزمایش‌های فرآوری مقدماتی.

با توجه به خصوصیات مواد معدنی مورد نظر آزمایش‌های دیگری نیز علاوه بر آزمایش‌های فوق مورد نیاز خواهد بود که از آن جمله می‌توان به آزمایش‌های مایع سنگین (فرآوری ثقلی)، آزمایش‌های جداسازی الکترواستاتیکی، مغناطیسی و برخی دیگر از آزمایش‌ها اشاره نمود که در مباحث بعدی به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

از آنجا که بررسی‌های مقدماتی، پایه کارهای بعدی است لذا نمونه اخذ شده باید حتی‌الامکان معرف کانسنگ مورد نظر باشد. به منظور طراحی و برنامه‌ریزی مطالعات و تحقیقات مراحل بعدی، علاوه بر پارامترهای اصلی ذکر شده موارد زیر نیز باید مشخص شوند:

- ابعاد ذرات موجود در مواد اولیه و حد بهینه خردایش با توجه به درجه آزادی؛
- وضعیت کانی‌ها از نظر خواص مغناطیسی، الکتریکی و وزن مخصوص؛
- بررسی و ارزیابی جداسازی غیرپیوسته در روش‌های مختلف فرآوری و انتخاب روش و یا روش‌های مناسب؛
- بررسی و تعیین پارامترهای موثر در فرآیند جداسازی؛
- تهیه نمونه‌ای از محصولات فرآوری شده به منظور بررسی و ارزیابی روش مناسب و یا ترکیبی از چند روش از نظر عیار کنسانتره، محصولات فرعی و میزان بازیابی آن‌ها، کمیت و کیفیت مواد با ارزش و میزان ناخالصی‌های همراه؛
- تهیه داده‌های لازم به منظور ارایه مدل‌های ریاضی، افزایش مقیاس و شبیه‌سازی فرآیند؛
- تعیین و طراحی شمای عملیات و انتخاب بهترین شمای عملیات بر اساس ارزیابی گزینه‌های مختلف؛
- موازنه جرمی مواد، آب، پالپ، عناصر کانی و نظایر آن بر روی شمای عملیات.

۱-۵-۲- مطالعات فرآوری در مقیاس پایه

پس از مطالعات آزمایشگاهی مقدماتی، به منظور افزایش اطلاعات و داده‌های مورد نیاز که امکان دستیابی به آن‌ها در مرحله آزمایشگاهی وجود ندارد، آزمایش‌های فرآوری در مقیاس پایه انجام می‌گیرد. آزمایش‌های مقیاس پایه، حد واسط عملیات آزمایشگاهی مقدماتی و پیشاهنگ است. آزمون‌های مقیاس پایه یک‌سری آزمایش‌های مکرر و پی‌درپی است که در مقیاس آزمایشگاهی انجام می‌شوند.

بر اساس نتایج به دست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی مقدماتی و مقیاس پایه، شمای عملیات برای مرحله واحد پیشاهنگ ارائه می‌شود.

بر اساس نتایج حاصل از مقیاس آزمایشگاهی و پایه، تعیین شمای اولیه عملیات مواد و انتخاب اولیه ماشین‌آلات و تجهیزات اصلی خطوط تولید فراهم می‌شود. با برآورد نیازمندی‌های عمومی فرآیند نظیر آب، برق و نظایر آن‌ها مطالعات امکان‌پذیری مقدماتی کنسار انجام می‌شود. آزمایش‌های مقیاس پایه برای دستیابی به اهداف زیر انجام می‌شوند:

- بررسی تاثیر پارامترهای موثر در عیار کنسانتره و بازیابی محصولات حد واسط؛
- تعیین مواد شیمیایی مورد نیاز و موازنه آن با مواد شیمیایی که در مرحله بار در گردش به همراه مواد حد واسط به سیستم وارد می‌شوند؛
- تاثیر نرمه، مواد مزاحم و انحلال‌پذیری آن‌ها؛
- بررسی جمع‌آوری کف و مشکلات آن در عملیات فلوتاسیون.

۱-۵-۳- مطالعات فرآوری در مقیاس پیشاهنگ

واحدهای تولیدی با مقیاس کوچک، عمدتاً به منظور الگویی از واحد اصلی که هنوز ساخته نشده است، انجام می‌گیرند که به آن واحد پیشاهنگ گفته می‌شود. تجهیزات این واحد در واقع همان دستگاه‌های واحد صنعتی ولی در مقیاس کوچک‌ترند.

عملیات آزمایشگاهی در مقیاس کوچک و به طور غیرپیوسته انجام می‌شود. برای طراحی یک واحد صنعتی و تعیین مشخصات تجهیزات آن نیاز به انجام آزمایش‌هایی در مقیاس نیمه‌صنعتی و به طور پیوسته است. به علاوه بررسی پاره‌ای از پارامترها از قبیل بازگرداندن محصولات میانی به بخشی از مسیر در عملیات غیرپیوسته امکان‌پذیر نیست. انجام آزمایش در مقیاس نیمه‌صنعتی بر روی نمونه‌های معرف کنسار در دست مطالعه، طراحی نهایی کارخانه را ممکن می‌سازد. اهداف آزمایش‌های پیشاهنگ گسترده و متنوع است. مهم‌ترین هدف این آزمایش‌ها تایید و تکمیل آزمایش‌های مقیاس پایه و ناپیوسته برای طراحی شمای عملیات فرآیند است، به نحوی که دستیابی به داده‌هایی که در مقایسه با آزمایش‌ها دقت بیشتری دارند به شرایط و مقیاس صنعتی نیز نزدیکتر است. علاوه بر این، اهداف دیگری نیز برای آزمایش‌های مقیاس پیشاهنگ مد نظر است که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

- بررسی و تایید نتایجی که در مقیاس پایه و به طور غیرپیوسته به دست آمده است؛
- محصول آزمایش پیشاهنگ برای طراحی فرآیندهای بعدی مانند ذوب و یا بازیابی محصولات فرعی دیگر به کار می‌رود؛
- ارزیابی نتایج بار ورودی به کارخانه به طور پیوسته یا متناوب و بهینه‌سازی کارخانه فرآوری؛

- آزمایش پیشاهنگ برای ارزیابی تاثیرات فنی و اقتصادی تغییرات ایجاد شده در شمای عملیات و وضعیت فرآیند یا انتخاب مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نتایج آن می‌تواند در عملیات صنعتی به کار رود؛
 - بررسی شمای عملیات طراحی شده در مرحله مطالعات آزمایشگاهی و توسعه و تکمیل آن و تعیین نمودار نهایی جریان مواد بر پایه پیوستگی آزمایش؛
 - استفاده از آزمایش‌های پیشاهنگ به عنوان آموزش برای اپراتورها یا سرویس‌دهنده‌ها؛
 - بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند، تعیین داده‌های مهندسی و پارامترهای اصلی جهت انتخاب و تعیین ظرفیت و تعداد ماشین‌آلات و تجهیزات در مقیاس صنعتی نظیر توان مصرفی ماشین‌آلات، زمان توقف، تعیین نوع و مقدار مصرف شیمیایی مختلف در فلوتاسیون، راندمان وزنی فرآیند، میزان بازیابی، تعیین میزان آب مصرفی کارخانه، آب بازگشتی و نیاز به آب تازه و غیره با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان کافی از دیدگاه فنی و اقتصادی؛
 - تعیین اثر آب بازگشتی به سیستم بر کارکرد سیستم در بلند مدت؛
 - بررسی امکان استفاده از آسیای خودشکن یا نیمه‌خودشکن^۳ در مدار آسیا و تعیین پارامترهای مورد نیاز برای انتخاب آن‌ها؛
 - تولید مقدار کافی محصول برای مطالعات ذوب و یا بازیابی محصولات جانبی^۴؛
 - تهیه مقدار کافی محصول پرعیار نهایی برای تحویل به مصرف‌کنندگان و خریداران بالقوه به منظور ارزیابی کمی و کیفی بازار مصرف تولیدات؛
 - امکان مطالعات جامع بر روی پسماند به دست آمده از آزمایش‌های نیمه‌صنعتی به منظور تهیه دستورالعمل برای انتخاب روش بهینه ساختمان سد باطله و همچنین بازیابی محصولات جانبی؛
 - انجام پژوهش و توسعه (R&D) به منظور روزآمد کردن تکنولوژی و بهینه‌سازی فرآیند؛
 - تولید و دستیابی به اطلاعات حالت پایدار فرآیند؛
 - استفاده از نتایج این آزمایش‌ها برای تامین مالی پروژه از قبیل دریافت وام و یا جلب مشارکت و سرمایه‌گذاری؛
 - طراحی تجهیزاتی که در مقیاس کوچکتر امکان‌پذیر نیست.
- جدول (۱-۲) برخی از تفاوت‌های آزمایش‌های کانه‌آرایی را در مقیاس‌های مختلف نمایش می‌دهد.

3 -Autogenous/Semi Autogenous

4 -By Product

جدول ۱-۲- تفاوت‌های آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ

عناوین	آزمایش‌های مقیاس آزمایشگاهی	آزمایش‌های مقیاس پایه	آزمایش‌های مقیاس پیشاهنگ
مشخصات نمونه	تا حد امکان باید نماینده خصوصیات مواد تحت فرآیند باشد. مقدار آن متناسب با نوع روش متفاوت است.	تا حد امکان باید نماینده خصوصیات مواد تحت فرآیند باشد. مقدار آن متناسب با نوع روش متفاوت است.	نمونه‌ها باید تا حد امکان نماینده کانساز باشد و مقدار آن بیشتر از مقیاس پایه است.
نوع فرآیند و تجهیزات	آزمایش‌ها به صورت ناپیوسته انجام می‌شوند و از تجهیزات فرآوری متناسب با نمونه‌های کوچک مانند سلول‌های فلوتاسیون ناپیوسته و رآکتورهای آزمایشگاهی استفاده می‌شود.	فرآیند پیوسته فرآوری در مقیاس آزمایشگاهی، همان تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند.	در اغلب موارد آزمایش‌ها در مجموعه‌ای از واحدهای پیوسته (مانند کارخانه صنعتی) انجام می‌شوند. نوع تجهیزات همانند تجهیزات کارخانه صنعتی با مقیاس کوچکتر است؛ در برخی موارد به علت بالا بودن ظرفیت یا پیچیدگی در بزرگ‌نمایی، عملیات را می‌توان به صورت نیمه‌پیوسته انجام داد.
لزوم انجام آزمایش	در بررسی امکان‌سنجی و قابلیت فرآوری کانسنگ و انتخاب پارامترهای عملیاتی اصلی و مقادیر آن‌ها در روش‌های مختلف فرآوری، انجام این آزمایش‌ها همواره ضروری است.	اغلب برای شبیه‌سازی فرآیند پیوسته در مقیاس آزمایشگاهی (به خصوص برای فرآیند فلوتاسیون) و بررسی اثر عواملی نظیر نرمه‌گیری و مصرف مواد شیمیایی بر عیار و بازیابی محصولات در چرخه پیوسته انجام می‌شود.	لزوم انجام این آزمایش‌ها قطعی نیست. ممکن است آزمایش‌های مقیاس آزمایشگاهی به تنهایی نیاز لازم را برآورده کنند. همچنین ممکن است که انجام آزمایش‌های مقیاس پیشاهنگ از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. بررسی تئوری‌های فرآیند، جریان پیوسته، داده‌های طراحی کارخانه، سیستم کنترلی و خودکار، بالا بردن سطح اطمینان و دانش فنی در تولید محصولات متنوع، شناخت مشکلات زیست‌محیطی، آموزش نیروی متخصص و نهایتاً اصلاح خطاها و کاهش ریسک با هزینه‌ای کمتر از شرایط کارخانه صنعتی

فصل ۲

آزمایش‌های مقدماتی

۱-۲- عوامل موثر در شناسایی مواد معدنی

۱-۱-۲- عوامل ظاهری و فیزیکی

- شکل کانی‌ها؛
- رنگ کانی‌ها و رنگ خاکه؛
- خواص مغناطیسی؛
- وزن مخصوص؛
- سختی؛
- سیستم تبلور؛
- مقاومت کانی؛
- خواص الکتریکی؛
- نوع شکست (رخ)؛
- نقطه ذوب بلور کانی.

۲-۱-۲- عوامل موثر در شناسایی دستگاهی

- رنگ (در روش‌های میکروسکوپی)؛
- شکل؛
- کلیواژ؛
- ضریب شکست؛
- بافت و تبلور؛
- دگرسانی و اکسیداسیون سطحی؛
- همراهی کانی‌های خاص با یکدیگر؛
- خواص مشخصه کانی در نور پلاریزه.

۲-۲- شرایط آزمایشگاه و امکانات مورد نیاز

امکانات و تجهیزات مورد نیاز برای آماده‌سازی نمونه‌ها و همچنین مطالعات برای انجام آن‌ها به روش‌های مختلف در جدول (۱-۲) درج شده است.

جدول ۲-۱- امکانات و تجهیزات مورد نیاز برای شناسایی نمونه

نوع مطالعه	امکانات و تجهیزات مورد نیاز
آماده سازی	<ul style="list-style-type: none"> - تجهیزات خردایش و طبقه‌بندی مانند آسیابها و سرندها - تقسیم‌کننده شانه‌ای - ترازو با دقت مناسب - دستگاه خشک‌کن - وسایل و مواد مورد نیاز در تهیه تیغه‌های نازک و مقاطع صیقلی (شامل ابزار برش سنگ و دستگاه‌های صیقل و غیره) - معرف‌های شیمیایی - مایعات سنگین
روش‌های ظاهری	<ul style="list-style-type: none"> - آهنربای دستی - مقیاس‌ها و ابزار اندازه‌گیری سختی - وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های مشخصات شیمیایی - چینی بدون لعاب برای تعیین رنگ خاکه - وسایل اندازه‌گیری وزن مخصوص - ذره‌بین دستی
روش‌های میکروسکوپی	<ul style="list-style-type: none"> - میکروسکوپ پلاریزان با قابلیت استفاده در نور عبوری و نور انعکاسی - تجهیزات جانبی برای میکروسکوپ مانند دوربین عکاسی و تیغه‌های کمکی - استریومیکروسکوپ (بینو کولار) - معرف‌های شیمیایی - ابزار و نرم‌افزارهای تجزیه تصویری
تجهیزات دستگاهی و تکمیلی	<ul style="list-style-type: none"> - دستگاه پراش اشعه X (XRD) با قابلیت اندازه‌گیری کمی در صورت امکان - میکروسکوپ الکترونی (SEM) مجهز به تجزیه تصویری - دستگاه میکروسوند (EPMA) - دستگاه‌های تجزیه شیمیایی کلی مانند جذب اتمی یا XRF* - طیف‌سنج مادون قرمز و سایر دستگاه‌های طیف‌سنجی بر حسب نیاز (تکمیلی)* - دستگاه تجزیه حرارتی DTA/TGA

* این روش‌ها به عنوان روش‌های تکمیلی می‌باشند و جزو روش‌های کانی‌شناسی نیستند.

۲-۳- خصوصیات فرد یا گروه آزمایش‌کننده

- داشتن حداقل مدرک کارشناسی در یکی از رشته‌های زمین‌شناسی یا مهندسی معدن آشنا به مباحث فرآوری برای فرد مطالعه‌کننده؛
- داشتن سابقه و تجربه کافی در مطالعات کانی‌شناسی کاربردی و روش‌های دستگاهی؛
- توانایی پردازش، تحلیل و تفسیر تغییر نتایج مطالعات مختلف شناسایی مواد معدنی؛

- استفاده از افراد با تجربه در مطالعه نمونه‌های کانی‌شناسی و همچنین تکنسین‌های مجرب در تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها؛
- برقراری ارتباط پیوسته با متخصصان فرآوری و مشاوره و تبادل اطلاعات.

۲-۴- مراحل انجام مطالعات شناسایی

۲-۴-۱- قبل از فرآوری

الف- بررسی گزارش‌های مراحل اکتشاف و کانی‌شناسی برای انتخاب نمونه‌های اولیه؛

ب- شناسایی مقدماتی و انجام آزمایش‌های ظاهری و استفاده از نتایج؛

پ- مطالعات میکروسکوپی نوری در مورد کانسنگ اولیه یا بخش‌های دانه‌بندی با هدف شناسایی و مطالعات درجه آزادی؛

ت- مطالعات تکمیلی کانی‌شناسی به روش‌های دستگاهی با هدف شناسایی بافت و عناصر سازنده و موثر در فرآوری کانسنگ، همچنین وضعیت درگیری یا آزادی عناصر یا کانی‌های ریز.

۲-۴-۲- حین یا پس از فرآوری (محصولات مختلف فرآوری)

الف- کنترل درجه آزادی محصولات خردایش: در هر مرحله از خردایش باید نمونه‌هایی از محصولات خرد شده تهیه شود و برای مطالعات درجه آزادی و به منظور کنترل فرآیند مورد بررسی قرار گیرند. در این مرحله معمولاً از استریومیکروسکوپ یا میکروسکوپ‌های نوری بر حسب ابعاد ذرات استفاده می‌شود.

ب- کنترل درجه خلوص و کیفیت کنسانتره: با مطالعات کانی‌شناسی کنسانتره، باید درجه خلوص محصولات برای کنترل عیار و موازنه فرآیند تعیین شود. مطالعه ویژگی‌های ذرات کنسانتره اغلب با میکروسکوپ الکترونی SEM به خصوص برای اذخال‌ها و ذرات در حد میکرون و ریزتر از میکرون (صدم میکرون) امکان‌پذیر است.

پ- کنترل عیار، دانه‌بندی و درجه آزادی در باطله: با مطالعات کانی‌شناسی باطله‌های کارخانه‌ها، باید اتلاف کانی‌های مفید و علت آن بررسی شود. در این مرحله از روش‌های مختلف دستگاهی همراه با تجزیه تصویری استفاده می‌شود.

۲-۵- آماده‌سازی نمونه برای مطالعات کانی‌شناسی

۲-۵-۱- تهیه مقطع نازک

الف- بریدن قطعه سنگ به وسیله تیغه الماسه به ورقه‌های موازی به ضخامت چند میلی‌متر؛

ب- چسباندن نمونه‌ها بر روی شیشه‌های استاندارد؛

پ- ساییدن سنگ متصل به شیشه بر روی صفحات دوار؛

ت- ادامه سایش بر روی پودرهای سنباده تا دستیابی به ضخامت ۳۰ میکرون؛

ث- چسباندن یک لایه نازک شیشه‌ای (لامل) روی مقطع.

نکته ۱: اگر نمونه در آب حل می‌شود (مثل نمک‌ها و نظایر آن) برای صیقل دادن به جای استفاده از آب، از گلیکول یا مایع دیگری که نمونه در آن حل نشود استفاده می‌شود.

نکته ۲: اگر نمونه ریزدانه و یا به صورت پودر باشد، ابتدا چسب را روی شیشه به طور کامل پهن می‌کنند و پودر نمونه را روی آن می‌پاشند تا لایه‌ای از نمونه شکل گیرد و پس از سفت شدن آن را صیقل می‌دهند.

نکته ۳: اگر نمونه به قدری سست باشد که در حین صیقل دادن، تکه‌هایی از آن جدا شود، باید مقداری از نمونه را برداشت و پس از پرس کردن آن در داخل پلی‌استر، مقطعی از آن را برش داد و تیغه‌ای نازک از آن تهیه کرد، سپس این تیغه را صیقل داد.

۲-۵-۲- تهیه مقطع صیقلی

الف- بریدن قطعه سنگ توسط تیغه الماسه؛

ب- پر کردن شکاف با رزین؛

پ- قالب‌زنی توسط رزین‌های سرد (پلی‌استر)؛

ت- سایش سطح نمونه به وسیله سنباده‌ها (از درشت به ریز) و سرانجام استفاده از اکسید آلومینیوم و مواد ساینده مشابه.

نکته ۱: برای تهیه مقطع صیقلی از نمونه‌های خرد شده، همانند روش یاد شده عمل می‌شود.

نکته ۲: ابعاد مقطع بستگی به هدف مطالعه و نوع ماده معدنی دارد.

نکته ۳: برای دستیابی به بهترین نتایج در مطالعات مقطع صیقلی (فلزی)، پس از تهیه مقطع باید نمونه‌ها در محل پوشیده

نگهداری شوند تا از اکسیداسیون سطحی آن‌ها جلوگیری شود.

۲-۵-۳- تهیه نمونه برای مطالعه پراش اشعه ایکس (XRD)

الف- پودر کردن یک نمونه کانسنگ از ماده معدنی تا ابعاد کوچکتر از ۵۰ میکرون؛

ب- قرار دادن پودر نمونه در قالب آن و پوشانیدن سطح آن با نوار چسب شفاف یا پاشیدن ذرات نمونه بر روی یک شیشه که

سطح آن با گریس پوشیده شده است.

نکته: یک روش جایگزین برای تهیه نمونه آن است که پودر ماده معدنی بر روی سطح متخلخل یک شیشه پخش شده و سپس

سطح نمونه صاف شود.

۲-۶- مطالعات درجه آزادی

۲-۶-۱- مراحل انجام مطالعات درجه آزادی

الف- خردایش (در صورت نیاز)؛

ب- تجزیه سرنندی در فراکسیون‌های مورد نظر؛

پ- تعیین جرم مخصوص (در صورت نیاز)؛

ت- جدایش کانی‌های با ارزش از باطله با استفاده از روش‌های جدایش مانند مایع سنگین (در صورت نیاز)؛

ث- انجام مطالعات درجه آزادی در هر فراکسیون؛

ج- ترسیم نمودارهای توزیع دانه‌بندی؛

چ- تهیه جدول (یا نمودار) توزیع ذرات درگیر و آزاد کانی با ارزش در هر بخش دانه‌بندی با استفاده از تصاویر و نتایج تجزیه

تصویری؛

ح- تجزیه و تحلیل نتایج و تعیین درجه آزادی؛

خ- بهینه‌سازی زمان خردایش و جداسازی در مرحله فرآوری.

۲-۶-۲- مشخصات نمونه‌ها

خردایش و طبقه‌بندی نمونه‌های اولیه سنگی اولین مرحله در تعیین درجه آزادی است. از نمونه‌های ماسه‌ای، نمونه‌های خرد شده یا فرآوری شده پس از طبقه‌بندی در فراکسیون‌های ابعادی مورد نظر برای مطالعات درجه آزادی، مقطع صیقلی و در صورت نیاز مقطع نازک تهیه می‌شود. این مقاطع با روش‌های میکروسکوپی همراه تجزیه تصویری مطالعه می‌شوند. در صورتی که شناسایی کانی یا کانی‌های مورد نظر بر اساس ویژگی خاص نظیر رنگ، با چشم امکان‌پذیر باشد، نمونه به همان صورت خرد شده و دانه‌ای در زیر استریومیکروسکوپ برای دستیابی به تخمینی از درجه آزادی و درگیری کانی‌ها مطالعه می‌شود. در هر صورت مهم‌ترین عامل، تعداد مقاطع مورد بررسی در تعیین درجه آزادی است، به گونه‌ای که معرف درجه آزادی کانی در کانسنگ یا فراکسیون دانه‌بندی باشد.

۲-۶-۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

اطلاعات مربوط به نحوه انجام آزمایش‌های درجه آزادی در جدول (۲-۲) بیان شده است.

جدول ۲-۲- نحوه انجام آزمایش‌های درجه آزادی

ملاحظات	ابزار / نحوه انجام	روش	
عدم توانایی روش در شناسایی ذرات ریز و جزئیات	مشاهده دانه‌های مواد خرد شده و ذرات در استریومیکروسکوپ	تصاویر استریوسکوپی	قدیمی
روشی وقت‌گیر و مشکل در مورد ذرات کوچک ماده معدنی و صرفاً در مورد مواد معدنی با تنوع کانی‌شناسی	مطالعات مقاطع موازی از نمونه کانسنگ به طور متوالی	مقاطع متوالی	
روشی وقت‌گیر به خصوص در تحلیل تصاویر	مطالعه مقاطع اتفاقی در جهات مختلف از نمونه کانسنگ	مقاطع اتفاقی	
تمایز و تفکیک کانی‌ها در تصاویر به علت هم‌پوشانی آن‌ها در سطح صیقلی، استفاده از میکروسکوپ الکترونی برای دستیابی به نتایج بهتر توصیه می‌شود.	اندازه‌گیری سطح ذرات در نمونه بر اساس تصاویر حاصل از دوربین‌های فیلم‌برداری	اندازه‌گیری سطح	جدید
تعیین اندازه خطوط و فواصل آن‌ها اهمیت زیادی دارد و متناسب با اندازه ذرات است. در هر حال شبکه برداشت باید سطح کل نمونه را بپوشاند.	اندازه‌گیری بر روی خطوط فرضی و موازی در سطح نمونه که میزان آن با نور متمرکز مشخص می‌شود.	اندازه‌گیری خطی	
فواصل خطوط شبکه در سطح نمونه متناسب با نسبت حجمی کانی‌ها در نمونه است. مقطع مورد مطالعه نیز باید به طور اتفاقی انتخاب شود.	اندازه‌گیری روی نقاط ناپوسته در محل تقاطع خطوط شبکه در سطح نمونه	اندازه‌گیری نقطه‌ای	

فصل ۳

مقیاس آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات نمونه‌ها

۳-۱-۱- وزن نمونه‌ها

فرآیند نمونه‌برداری و آزمایش، فعالیتی ضروری و پیوسته در سراسر عمر یک پروژه معدنکاری است. برای انجام هر آزمایش فرآوری به صورت استاندارد، بر اساس ماهیت آزمایش اعم از فیزیکی، شیمیایی و فیزیکی- شیمیایی و همچنین مقیاس آزمایش، میزان نمونه مشخصی لازم است.

در جدول (۳-۱)، وزن مورد نیاز برای نمونه‌های قابل استفاده در آزمایش‌های فرآوری مختلف در هر سه مقیاس آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ به تفکیک درج شده است.

جدول ۳-۱- وزن نمونه‌های مورد نیاز در آزمایش‌های مختلف

وزن نمونه مورد نیاز در هر آزمایش (Kg)	نام آزمایش	مقیاس	نوع آزمایش
۱۲-۱۵	اندیس کار باند (آسیای میله‌ای) (Bond Work Indices (Rod))	آزمایشگاهی	خردایش
۱۲-۱۵	اندیس کار باند (آسیای گوله‌ای) (Bond Work Indices (Ball))		
۱/۶	اندیس سایش باند (Bond Abrasion Indices)		
۱۵-۳۰	اندیس کار باند (سنگ‌شکن) (Bond Work Indices (Crushing))		
۲	اندیس قدرت آسیای نیمه‌خودشکن (Autogenous Media Competency (Advanced))		
۲۰۰	آزمایش قابلیت واسطه آسیای خودشکن (Autogenous Media Competency (Advanced))	پایه	
۱۰۰۰۰۰-۳۰۰۰۰۰	آزمایش پیشاهنگ آسیای خودشکن و نیمه‌خودشکن (AG/SAG PilotPlant)	پیشاهنگ	
۱-۲	اولیه (رافر) (Rougher)	آزمایشگاهی	فلوتاسیون
۱۵	شستشو (Cleaner (Grind-Grade-Recovery))		
۱۵-۲۵	سیکل بسته (Locked-Cycle)	پایه	
۱۰۰-۵۰۰	طراحی خط (Circuit Design)	پیشاهنگ	
۵۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	مطالعات پیشاهنگ (Pilot Plant)		

ادامه جدول ۳-۱- وزن نمونه‌های مورد نیاز در آزمایش‌های مختلف

وزن نمونه مورد نیاز در هر آزمایش (Kg)	نام آزمایش	مقیاس	نوع آزمایش
۱	مطالعات تیکنر کنسانتره یا باطله (Concentrate or Tailing Thickener)		آب‌گیری
۱	مطالعات فیلتر باطله و کنسانتره (Concentrate or Tailing Filtration)		
۰/۱ - ۰/۲	مطالعات جدایش توسط واسطه سنگین (Heavy Liquid Separation)	آزمایشگاهی و پایه	ثقلی، مغناطیسی و الکترواستاتیکی
۵۰ - ۱۰۰	ثقلی، مغناطیسی، الکترواستاتیکی (Gravity/Magnetic/Electrostatic)		
۵۰۰۰ - ۲۰۰۰۰	مطالعات پیشاهنگ (Pilot Plant)	پیشاهنگ	
۰/۰۵ - ۰/۱	بطری غلطان (Bottle Roll)	آزمایشگاهی	انحلال
۲ - ۵	آزمایش‌ها در سیستم‌های همزن‌دار غیرپیوسته (Batch Agitation Leaching)		
۹	آزمایش‌ها ستونی با قطر کم (Small Diameter Columns)		
۳۰ - ۵۰	آزمایش‌ها در سیستم‌های همزن‌دار نیمه‌پیوسته (Semi-Continuous)	پایه	
۸۰	آزمایش‌ها ستونی با قطر متوسط (Intermediate Diameter Columns)		
۶۰۰	آزمایش‌ها ستونی با قطر زیاد (Large Diameter Columns)	پیشاهنگ	

۳-۱-۲- خصوصیات کمی و کیفی نمونه

قابلیت دسترسی و هزینه، دو فاکتور مهم در تهیه نمونه هستند و در نمونه‌های انتخابی، تنوع کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و خصوصاً مشخصات فیزیکی و مکانیکی در کانسنگ و کانسار باید مد نظر قرار گیرند. نمونه‌گیری از کارخانه‌های در حال فعالیت آسان‌تر است. نمونه انتخاب شده باید معرف کانسنگی باشد که تحت عملیات فرآوری قرار دارد. نوع کانسنگ، تعداد و وزن نمونه‌ها، ماهیت نمونه‌برداری و نمونه‌گیری، حمل و نگهداری نمونه‌ها، اکسیداسیون نمونه و بسیاری از پارامترهای دیگر در فرآیندهای پس از خردایش تاثیرگذار است، لذا کنترل این پارامترها در مراحل قبل و پس از خردایش ضروری است. در جدول (۳-۲) خصوصیات کمی و کیفی نمونه‌های مورد استفاده در مقیاس آزمایشگاهی درج شده است.

جدول ۳-۲- مشخصات نمونه‌ها برای مطالعات مقیاس آزمایشگاهی

نوع روش	نوع آزمایش	خصوصیات کمی و کیفی نمونه‌ها	
فیزیکی	خردایش و دانه‌بندی	مقدار نمونه لازم حدود ۲۵۰ کیلوگرم است. معمولاً برای انجام آزمایش‌های قابلیت خردشوندگی به منظور تعیین انرژی لازم به روش اندیس کار باند حداقل ۲۵ کیلوگرم نمونه لازم است. برای تعیین قابلیت خردشوندگی به روش ضربه‌ای، ابعاد نمونه‌ها باید در حدود ۸ الی ۱۷ سانتی‌متر باشد.	
	جدایش ثقلی	روش‌های متداول واسطه سنگین و نظایر آنها	حداکثر ابعاد ذرات قابل جدایش در این روش ۲۰/۳۲-۱۵/۲۴ سانتی‌متر (۶-۸ اینچ) است. نمونه مورد نظر برای آزمایش با سرنند لرزان و روش تر طبقه‌بندی می‌شود تا حتی‌الامکان مواد نرمه از آن جدا شود.
		روش‌های استفاده از لایه‌های نازک سیال	حداقل ابعاد ذرات قابل جدایش ۱۰ میکرون است. ماریچ همفری: برای جدایش ذرات در ابعاد ۱۴-۲۰۰ مش مناسب است که در مورد سنگ آهن به ۸ تا ۱۰ مش نیز میرسد. چگالی پالپ معمولاً بین ۲۰-۳۰ درصد وزنی جامد و دبی خوراک‌دهی ۰/۵-۲/۵ تن در ساعت برای هر دستگاه و متناسب با ابعاد خوراک است.
		جیگ	حداقل ابعاد مناسب ذرات ۱ میلی‌متر با بازدهی مطلوب و ۱۵۰ میکرون با بازدهی قابل قبول است. هر چه محدوده دانه‌بندی نمونه کوچکتر باشد، کانی‌های با اختلاف وزن مخصوص کمتر را می‌توان از یکدیگر جدا کرد برای شستشوی زغال سنگ، اندازه ۲۰۰ میلی‌متر حداقل مجاز ابعاد دانه‌ها ذکر شده است و مواد ریزتر را قبلاً جداسازی می‌کنند.
	میز لرزان	حداکثر ابعاد ذرات برای زغال، تقریباً ۲ سانتی‌متر و برای سایر مواد معدنی ۱۰ مش است. جدایش خاکستر با ابعاد حداقل ۲۰۰ مش و جدایش پیریت آزاد در ابعاد حداقل ۳۲۵ مش از زغال سنگ امکان‌پذیر است. در مورد مواد معدنی با وزن مخصوص زیاد، حداقل ابعاد ذرات قابل جدایش کمتر از ۳۲۵ مش است.	
روش‌های مغناطیسی	وزن ۱۰-۵۰ گرم و ابعاد ریزتر از ۵۰۰ میکرون برای لوله دیویس، برای روش‌های خشک و تر مقدار چند کیلوگرم نمونه با دانه‌بندی ۳ میلی‌متر تا ۷۵ میکرون برای روش‌های خشک و دانه‌بندی ریزتر از ۷۵ میکرون برای روش‌های تر		
فیزیکی و شیمیایی	فلوتاسیون	مقدار نمونه مورد نیاز برای آزمایش بر حسب نوع کانی یا کانسنگ تعیین می‌شود. عناصر سازنده در نمونه با انجام تجزیه شیمیایی کلی مشخص می‌شوند.	
شیمیایی	فروشویی	نمونه‌های نماینده را می‌توان تا ابعاد ۷۵ میکرون خرد کرد. در آزمایش‌های بطری غلطان، حداکثر ابعاد دانه‌های مواد معدنی می‌تواند ۴ سانتی‌متر باشد. مقدار نمونه در بررسی‌های فروشویی برحسب نوع بررسی و هدف آن متغیر است ولی به طور معمول در هر وعده یک کیلوگرم آزمایش می‌شود.	
آب‌گیری و جدایش مایع - جامد		معمولاً ۱ کیلوگرم نمونه به صورت پالپ لازم است.	

۳-۱-۳- شرایط آزمایشگاه و امکانات مورد نیاز

مهم‌ترین ابزار و وسایل فرآوری مواد معدنی عبارتند از:

الف- لوازم عمومی آزمایشگاه

- دماسنج؛

- رطوبت‌سنج؛

- خشک‌کن؛

- فیلتر برای آب‌گیری؛
 - ابزار توزین نمونه با دقت‌های مختلف (ترازو با دقت مناسب و باسکول برای نمونه‌های کلوخه‌ای)؛
 - سرطاس؛
 - ظروف آزمایشگاهی و ابزار و وسایل آزمایشگاهی مانند بشر، بورت، پیپت و نظایر آن؛
 - pH متر، پتانسیومتر و معرف‌های لازم و دیگر تجهیزات مرتبط آزمایشگاهی.
- ب- خردایش و طبقه‌بندی
- سنگ‌شکن‌های فکی، مخروطی، غلطکی، چکشی و ضربه‌ای که انواع مختلفی دارند؛
 - انواع آسیاها شامل میله‌ای، گلوله‌ای، آسیاهای استاندارد باند و سرامیکی برای خردایش در شرایط خشک و تر؛
 - سری سرندهای استاندارد (مانند تایلر، ASTM و نظایر آن) برای طبقه‌بندی خشک و تر و سری سرندهای با چشمه درشت (چند میلی‌متر)؛
 - دستگاه لرزاننده سرند مجهز به سینی و سرپوش سرندها؛
 - دستگاه لیزری اندازه‌گیری ابعاد ذرات؛
 - ابزار طبقه‌بندی و تقسیم‌کن مانند ریفل‌ها (تقسیم‌کن‌های شانه‌ای).
- پ- جداسازی به روش ثقلی
- انواع میز لرزان از جمله میز ویلفل، میز نرمه و جداکننده استوانه‌ای مولتی‌گراویتی برای ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون؛
 - انواع جیگ آزمایشگاهی؛
 - مایعات سنگین؛
 - دستگاه‌های سانتریفیوژ مانند دیناوپرپول و سیکلون و به ویژه سانتریفیوژ معمولی؛
 - سایر تجهیزات جدایش ثقلی مانند ماریج همفری؛
 - فیدر برای خوراک‌دهی و دی‌سنج برای تنظیم جریان آب؛
 - تجهیزات لازم برای اندازه‌گیری وزن مخصوص مانند پیکنومتر؛
 - وسایل نمونه‌گیری؛
 - تجهیزات و امکانات کانی‌شناسی و به ویژه میکروسکوپ دوچشمی.
- ت- جداسازی به روش الکترواستاتیکی و مغناطیسی
- دستگاه‌های جداکننده الکترواستاتیکی؛
 - دستگاه‌های جداکننده مغناطیسی به روش تر (شدت بالا و کم)؛
 - دستگاه‌های جداکننده مغناطیسی به روش خشک (شدت بالا و کم)؛
 - لوله دیویس؛
 - جداکننده ایزودینامیک باریر؛

- آهنربای دستی؛
- وسایل نمونه‌گیری.
- ث- تجهیزات فلوتاسیون
 - دستگاه‌های فلوتاسیون مکانیکی با سلول‌های فلوتاسیون در ابعاد متناسب و پاروی کف‌گیری؛
 - کمپرسور و تزریق‌کننده هوا در پالپ (در صورت تجهیز ماشین فلوتاسیون به این سیستم)؛
 - مواد شیمیایی مورد نیاز در آزمایش فلوتاسیون شامل انواع کلکتورها، تنظیم‌کننده‌ها، کف‌سازها، بازداشت‌کننده‌ها، راسب‌کننده‌ها و فعال‌کننده‌ها؛
 - هیدروسیکلون برای نرمة‌گیری؛
 - ابزار تعیین وزن مخصوص پالپ و مواد جامد؛
 - pHمتر و پتانسیومتر ؛
 - ترازوی دقیق (حداقل تا هزارم گرم)؛
 - لوازم نمونه‌گیری و سایر وسایل آزمایشگاهی نظیر بشر و استوانه مدرج؛
 - دستگاه تعیین دانه‌بندی ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون (با روش‌های ویژه)؛
 - لوله‌هالیموند برای آزمایش‌های میکروفلوتاسیون.
- ج- امکانات مرتبط با آزمایش‌های فروشویی
 - همزن‌ها و ظروف مناسب؛
 - بطری و دستگاه غلطاننده برای آزمایش بطری غلطان؛
 - ستون‌های فروشویی با ابعاد متناسب مقیاس آزمایشگاهی و مجهز به مولد کف (اسپارجر) محلول؛
 - مواد شیمیایی مورد استفاده در فروشویی شامل عوامل فروشویی (اسیدها، بازها و نمک‌ها)، تنظیم‌کننده‌ها (مانند آهک) و سایر مواد شیمیایی؛
 - ابزار و وسایل آزمایشگاهی مانند بشر، بورت، پیپت و نظایر آن؛
 - دستگاه اتوکلاو آزمایشگاهی برای فروشویی تحت فشار؛
 - رانکوباتور لرزان و سایر وسایل مرتبط با فروشویی باکتریایی؛
 - وسایل کانی‌شناسی؛
 - وسایل و دستگاه‌های تجزیه شیمیایی مانند جذب اتمی یا سایر آنالیزورهای مواد محلول (در صورت امکان)؛
 - pHمتر، پتانسیومتر و مواد شیمیایی؛
 - سایر تجهیزات معمول در آزمایش‌های شیمیایی.
- چ- امکانات جانبی و مصرفی آزمایشگاه
 - آب؛
 - برق؛
 - هوای فشرده؛

- سیستم جمع‌آوری و دفع فاضلاب؛

- سیستم تهویه و غبارگیری؛

۳-۱-۴- خصوصیات فرد یا گروه آزمایش‌کننده

فرد یا گروه آزمایش‌کننده باید دارای صلاحیت‌های زیر باشد:

- حداقل مدرک کارشناسی در رشته مرتبط مطابق با قانون نظام مهندسی معدن و تجربه حداقل ۵ سال در آزمایشگاه برای انجام آزمایش‌های فرآوری با قابلیت‌های علمی و تجربی لازم؛
- بسته به ساختار و چگونگی آزمایش معمولاً ۱ تا ۲ نفر متخصص و یا ۱ نفر متخصص و ۲ نفر تکنسین یا کارگر ماهر در این مقیاس برای انجام آزمایش‌ها مناسب است؛
- فرد (گروه) آزمایش‌کننده باید قبل از انجام آزمایش، اسناد و مدارک لازم را به طور کامل و دقیق دریافت و کنترل کرده و بعد از انجام آزمایش نیز فرم اطلاعات مربوط به هر آزمایش را تکمیل کند.
- نوشتن گزارش کار پس از انجام آزمایش‌ها نیز به عهده فرد (گروه) آزمایش‌کننده است.

۳-۱-۵- اسناد، مدارک، نقشه‌ها و گزارش‌های مورد نیاز

- در شروع آزمایش‌های فرآوری در مقیاس آزمایشگاهی، گزارش آزمایشگاهی که طی مرحله اکتشاف انجام شده به شرح زیر مورد نیاز است:
- الف- گزارش کانی‌شناسی با تکیه بر نکات زیر:
 - مهم‌ترین کانی‌ها و اجزای تشکیل دهنده و مقدار آن‌ها؛
 - وضعیت درگیری کانی‌ها؛
 - تعیین کانی‌های با ارزش و اقتصادی مورد نظر برای فرآوری؛
 - تعیین و شناسایی ناخالصی‌های موجود (باطله) در مجاورت کانی‌های با ارزش و بررسی امکان و روش حذف آن‌ها در فرآوری؛
 - درجه آزادی کانی‌های با ارزش؛
 - مشخص کردن تغییرات ماده معدنی در محدوده کانسار و پیشنهاد نقاط نمونه‌برداری.
- ب- هر گونه سوابق و نتایج عملیات استحصال ماده معدنی از معدن (کانسار) مورد نظر
- پ- اطلاعات مربوط به روش‌های فرآوری در کانسنگ‌های مشابه و شمای عملیات موجود در کارخانه‌های مشابه

۳-۱-۶- فهرست و عناوین اصلی ارایه نتایج و جداول آزمایش‌های فرآوری

پس از اتمام آزمایش‌ها باید گزارش تهیه شود. گزارش مذکور باید جامع و کامل باشد و به وسیله فرد (گروه) آزمایش‌کننده تهیه شود. عناوین اصلی گزارش به شرح زیراند:

الف- تعیین مشخصات نمونه

- تجزیه شیمیایی؛

- درجه آزادی کانی‌ها با توجه به محدوده‌های ابعاد مختلف و مطالعات میکروسکوپی؛

- پتروگرافی؛

- وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)؛

- رطوبت؛

- سختی؛

- سایش؛

- درجه اکسیداسیون؛

- توزیع ابعادی؛

- حداکثر ابعاد نمونه.

ب- مطالعات خردایش

- اندیس کار باند (آسیای گلوله‌ای و میله‌ای)؛

- اندیس سایش باند؛

- اندیس هاردگرو؛

- اندیس قدرت آسیای نیمه‌خودشکن^۱؛

- اندیس خودشکنی مک‌فرسون^۲؛

- آزمایش قابلیت واسطه خودشکن^۳.

پ- طبقه‌بندی و جدایش با تجهیزات مختلف از جمله هیدروسیکلون

ت- اطلاعات فلوتاسیون

- بهینه‌سازی اطلاعات اولیه؛

- خردایش اولیه؛

- مواد شیمیایی؛

1 -SAG Power Index

2 -MacPherson Autogenous Index

3 -Autogenous Media Competency

- زمان فلوتاسیون.
- ث- بهینه‌سازی فلوتاسیون شستشو
- تعداد مراحل شستشو؛
- شستشوی رمق‌گیر؛
- خردایش مجدد (با توجه به مطالعات درجه آزادی)؛
- مواد شیمیایی؛
- ج- آب‌گیری
- تیکنر کنسانتره؛
- فیلتر کنسانتره؛
- تیکنر باطله؛
- فیلتر باطله.
- چ- پرعیارسازی ثقلی
- جدایش با مایعات سنگین؛
- جدایش با میز؛
- جدایش با جیگ؛
- جدایش با سانتریفوژ؛
- جدایش با ماریپیج همفری؛
- جدایش با جداکننده ثقلی استوانه‌ای^۴.
- ح- جدایش مغناطیسی
- جدایش خشک با شدت زیاد؛
- جدایش خشک با شدت کم؛
- جدایش تر با شدت زیاد؛
- جدایش تر با شدت کم.
- خ- جدایش الکترواستاتیکی
- د- انحلال
- مطالعات در ستون‌های با قطر کم و متوسط؛
- مطالعات در سیستم‌های همزن آزمایشگاهی.

فصل ۴

مقیاس پایه

۴-۱- مشخصات کلی مقیاس پایه

تفاوت اصلی این آزمایش‌ها و آزمایش‌های مقدماتی، پیوسته بودن مدار عملیات در این آزمایش‌ها است و این امر موجب می‌شود که داده‌های حاصل به شرایط کارخانه مقیاس نزدیکتر باشند. با آزمایش‌های مقیاس پایه می‌توان اطلاعات متالورژیکی را در حد یک پیشاهنگ کوچک به دست آورد. در شرایط خاص (فلوتاسیون) حتی بدون انجام مطالعات پیشاهنگ و تنها با انجام آزمایش‌های مدار بسته می‌توان شمای عملیات کارخانه را طراحی کرد که این امر مستلزم توانایی تکنسین‌ها و مهندسان مربوطه است. آزمایش‌های مدار بسته به منظور دستیابی به اهداف زیر انجام می‌شوند:

- بررسی تاثیر پارامترهای موثر در عیار کنسانتره و بازیابی محصولات حد واسط؛

- تعیین مواد شیمیایی مورد نیاز و موازنه آن با مواد شیمیایی که در مرحله بار در گردش به همراه مواد حد واسط به سیستم وارد می‌شوند؛

- تاثیر نرمه، مواد مزاحم و کانی‌هایی که قابلیت انحلالشان در فلوتاسیون زیاد است و تعیین حد مجاز آن‌ها؛

- بررسی جمع‌آوری کف و مشکلات آن.

آزمایش‌های مدار بسته بیشتر در فرآیندهای فلوتاسیون به کار می‌روند. علت آن است که همواره نتایج مطالعات آزمایشگاهی جدایش فلوتاسیون را نمی‌توان در تمام موارد به مقیاس صنعتی تعمیم داد. به علت تاخیر عوامل مختلف در فرآیندهای فلوتاسیون، تنها در مدارهای بسته و عملیات مداوم، امکان مطالعه و بررسی فرآوری به روش فلوتاسیون وجود دارد. از این رو آزمایش‌های مقیاس پایه و عملیات پیشاهنگ در فرآیندهای فلوتاسیون بسیار حایز اهمیت هستند.

۴-۱-۱- برآورد نتایج آزمایش‌های مدار بسته

نتایج حاصل از آزمون‌های مدار بسته یا بر اساس داده‌های عیارسنجی و یا به وسیله اطلاعات بازیابی و مقدار کانی با ارزش در محصولات نهایی به نسبت بار اولیه ارزیابی می‌شوند. روش دوم بیشتر کاربرد دارد. معمولاً میانگین حجمی داده‌های دو چرخه آخر در گزارش ارایه می‌شود.

در برخی شرایط، زمانی که وضعیت مدار و بافت و ساختار مواد معدنی پیچیده باشد امکان رسیدن به حالت تعادل وجود ندارد و با صرف هزینه و زمان زیاد نیز هم نتیجه درست و منطقی به دست نمی‌آید. در چنین مواردی باید مدار عملیات به شکل آزمون‌های ناپیوسته و پله‌ای شبیه‌سازی شوند. ارزش این تحقیقات در این است که با انجام کمترین تکرار در آزمایش‌های مدار بسته امکان پیش‌بینی و برآورد نتایج وجود دارد.

۴-۱-۲- محدودیت‌های مقیاس پایه

با وجود تمام مزایای آزمایش‌های مقیاس پایه به ویژه در مدارهای فرآوری ساده این عملیات با محدودیت‌های زیر روبه‌رو است.

الف- عدم استفاده از آن در آموزش‌دهی اپراتورها؛

ب- حجم ناکافی محصول تولید شده برای انجام مطالعات بعدی؛
 پ- اغلب اطلاعات و داده‌های لازم برای طراحی نهایی کارخانه را به دست نمی‌دهد.
 از آنجا که در مورد ذخایر بزرگ حجم نمونه لازم باید زیاد باشد و ممکن است استفاده از آسیاهای خودشکن نیز لازم باشد و یا در مواردی که محصولات فرعی با اهمیت باشند معمولاً نمی‌توان از آزمون‌های آزمایشگاهی و مقیاس پایه استفاده کرد و انجام آزمایش‌های پیشاهنگ ضروری است.

۴-۲- مشخصات کمی و کیفی نمونه‌ها

برخی آزمون‌ها که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند در مقیاس پایه نیازی به تکرار آن‌ها نیست و همان نتایج در مقیاس صنعتی هم قابل استفاده است، مانند برخی آزمایش‌های خردایش از جمله اندیس کار باند یا آزمایش‌های تعیین توابع شکست و انتخاب، اما برخی دیگر از آزمایش‌ها اساساً در مقیاس پایه و حتی پیشاهنگ جواب قابل اطمینانی به دست نمی‌دهد مانند آزمایش‌های فلوتاسیون که اکتفا به آزمون آزمایشگاهی خطر بزرگی است.
 میزان نمونه‌ها در اکثر آزمایش‌ها در مقیاس پایه و آزمایشگاهی یکسان و تفاوت در پیوسته یا نیمه‌پیوسته بودن مسیر آزمایش است.

جدول (۳-۱) وزن مورد نیاز برای نمونه‌های قابل استفاده در آزمایش‌های کانه‌آرایی مختلف در هر سه مقیاس آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ را به تفکیک نشان می‌دهد.

۴-۳- شرایط آزمایشگاه برای مقیاس پایه

معمولاً تجهیزات و دستگاه‌ها در مقیاس پایه بر اساس مطالعات اولیه (امکان‌سنجی) در مقیاس آزمایشگاهی و متناسب با روش‌های در نظر گرفته شده برای فرآوری کانسنگ انتخاب می‌شود. بنابراین در این مقیاس بر خلاف مقیاس آزمایشگاهی، دستگاه‌های فرآوری در روش‌های جداسازی که در مطالعات اولیه بررسی شده، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و برای انتخاب و طراحی مدار فرآوری مواد معدنی در مقیاس کارخانه پیشاهنگ، نیاز به بررسی‌های طراحی‌های عملیاتی و افزایش مقیاس است.

۴-۴- خصوصیات فرد یا گروه آزمایش‌کننده

فرد یا گروه آزمایش‌کننده باید دارای شرایط زیر باشد:
 - حداقل مدرک کارشناسی در رشته مرتبط مطابق قانون نظام مهندسی معدن و تجربه حداقل ۵ سال در آزمایشگاه برای انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی با قابلیت‌های علمی و تجربی لازم؛
 - بسته به ساختار و چگونگی آزمایش معمولاً ۱ تا ۲ نفر متخصص و یا ۱ نفر متخصص و ۲ نفر تکنسین یا کارگر ماهر در این مقیاس برای انجام آزمایش‌ها مناسب است؛

- شناخت و داشتن اطلاعات کافی از علم فرآوری مواد معدنی برای شخص آزمایش کننده الزامی است؛
- فرد (گروه) آزمایش کننده باید قبل از انجام آزمایش، اسناد و مدارک لازم را به طور کامل و دقیق دریافت و کنترل کرده و بعد از انجام آزمایش نیز فرم اطلاعات مربوط به هر آزمایش را تکمیل کند؛
- تهیه گزارش کار پس از انجام آزمایش ها نیز به عهده اپراتور اصلی یعنی فرد متخصص است.

۴-۵- اسناد و مدارک، نقشه ها و گزارش های مورد نیاز در مقیاس پایه

نتایج حاصل از مقیاس آزمایشگاهی مبنای آزمایش های بعدی در مقیاس پایه هستند و تفاوت عمده آن با مقیاس آزمایشگاهی استفاده از حجم نمونه بیشتر و انجام بیشتر آزمون ها به صورت پیوسته است، مانند فلوتاسیون که نتایج آن در سیکل بسته دارای اعتبار بیشتر و به مقیاس صنعتی نزدیک تر است.

اسناد و مدارک مورد نیاز برای انجام آزمایش ها در مقیاس پایه عبارتند از:

الف- گزارش اکتشاف به صورت کامل

ب- نتایج آزمایش های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی

پ- گزارش مشخصات و میزان مصارف شامل:

- مشخصات مواد شیمیایی مورد مصرف؛

- میزان آب مصرفی در آزمایش های قبلی؛

- میزان انرژی مصرفی؛

- میزان بار خردکننده مصرفی؛

- گزارش آلودگی های حاصل از آزمایش های فرآوری.

مساله مهم در مقیاس پایه توجه به اثرات برگشتی پارامترهایی نظیر آب و مواد شیمیایی و همچنین اثرات زیست محیطی ناشی از دفع باطله و مواردی از این قبیل است که نقش این آزمایش ها را در مقابل مقیاس آزمایشگاهی پررنگ تر می کند.

۴-۶- فهرست و عناوین اصلی ارایه نتایج و جداول آزمایش های کانه آرایی در مقیاس پایه

فهرست عناوین اصلی گزارش های مقیاس پایه به شرح ذیل است:

الف- مطالعات خردایش

- اندیس قدرت آسیای نیمه خودشکن؛

- اندیس باند؛

- آزمایش بار خردکننده.

ب- طبقه‌بندی و جدایش با تجهیزات مختلف از جمله هیدروسیکلون

پ- اطلاعات فلوتاسیون شامل:

- بهینه‌سازی اطلاعات اولیه؛

- خردایش اولیه؛

- مواد شیمیایی؛

- زمان فلوتاسیون.

ت- بهینه‌سازی مراحل فلوتاسیون شستشو

- تعداد مراحل شستشو؛

- شستشوی رمق‌گیر؛

- خردایش مجدد (با توجه به مطالعات درجه آزادی)؛

- مواد شیمیایی.

ث- نتایج مطالعات آزمایشگاهی که به عنوان مبنای کار استفاده می‌شود.

- آزمایش‌های ناپیوسته؛

- مطالعات مدار بسته.

ج- مطالعات آزمایش‌های مدار بسته

- موازنه شمای عملیات؛

- بار در گردش؛

- بهینه‌سازی کلکتور و کف‌ساز؛

- آب قابل بازیابی؛

- منحنی عیار بازیابی نهایی.

چ- آب‌گیری

- تیکنر کنسانتره؛

- فیلتر کنسانتره؛

- تیکنر باطله؛

- فیلتر باطله.

ح- پرعیارسازی ثقلی

- جدایش با مایعات سنگین؛

- جدایش با میز؛

- جدایش با جیگ؛
 - جدایش با ساتتریفور؛
 - جدایش با ماریپیج همفری؛
 - جدایش با جداکننده ثقلی استونه‌ای.
- خ- جدایش مغناطیسی
- جدایش خشک با شدت زیاد؛
 - جدایش خشک با شدت کم؛
 - جدایش تر با شدت زیاد؛
 - جدایش تر با شدت کم.
- د- جدایش الکترواستاتیکی
- ذ- انحلال
- مطالعات در ستون با قطر متوسط و زیاد؛
 - مطالعات در سیستم‌های همزن آزمایشگاهی.

فصل ۵

مقیاس پشاهنگ

۱-۵- مشخصات کمی و کیفی نمونه‌ها

مقدار نمونه تابع اندازه بزرگترین قطعات نمونه آزمایش و اندازه و میزان خوراک‌دهی یا ظرفیت تجهیزات مورد استفاده است. به عنوان نمونه در یک طراحی مناسب مدار برای آسیاها، مقدار نمونه ۵ تا ۱۰ تن در هر آزمایش است. در زیر میزان نمونه مورد نیاز به منظور انجام آزمون‌های پیشاهنگ به صورت کلی برای برخی آزمون‌ها آمده است.

۱-۱-۵- فلوتاسیون

الف- مقدار نمونه: بر اساس دوره یک ماهه برآورد می‌شود. به طور معمول مقدار بار اولیه از ۱ تا ۲ تن در ساعت مناسب است. البته در صورتی که ظرفیت واحد پیشاهنگ کم باشد این مقدار ممکن است به ۲۵ تا ۲۵۰ کیلوگرم نیز کاهش یابد.

ب- دانه‌بندی نمونه که بسته به آزمایش و جنس خوراک متفاوت است و اهمیت ویژه‌ای دارد.

۲-۱-۵- فروشویی

ابعاد نمونه از ابعاد سنگ استخراجی یا آتشیاری شده (در هیپ یا دامپ) تا ابعاد ذرات خردایش شده و نهایتاً ابعاد کنسانتره (حاصل از مراحل پرعیارسازی) متغیر است. مقدار نمونه متناسب با روش است. در مورد آزمایش در محل انباشت نمونه (فروشویی توده‌ای) به نمونه بیشتری نیاز است.

۲-۵- شرایط و امکانات مورد نیاز مرحله پیشاهنگ

۱-۲-۵- واحد پیشاهنگ

نتایجی که از مطالعات و آزمایش‌های پیشاهنگ به دست می‌آید تا حد زیادی وابسته به نوع آزمایشگاه و نیز چند منظوره و یا تک منظوره بودن است.

الف- واحد پیشاهنگ چند منظوره

این آزمایشگاه‌ها محل و ساختمان معین و ثابتی دارند و از دستگاه‌هایی با مقیاس کوچک تشکیل شده‌اند مثلاً مخازن و سلول‌های فلوتاسیون، آسیاها، سنگ‌شکن‌ها، جداکننده‌های مختلف، پمپ‌ها، لوله‌ها و نظایر آن‌ها. این دستگاه‌ها را می‌توان به صورت‌های مختلفی در کنار هم قرار داد و ترکیب کرد تا مدار مشخصی را تشکیل دهند.

برای استفاده از دستگاه‌های چند منظوره (که برای آزمایش‌های مختلفی به کار گرفته می‌شوند) باید به دو نکته زیر توجه کرد:

- باید مطمئن شد که دستگاه‌های نصب شده تمام شرایط ایمنی لازم جهت انجام فرآیند خاص مورد نظر را دارا هستند. مثلاً شیرهای اطمینان به منظور کنترل صحیح فشار، تنظیم شوند. پس از شروع آزمایش باید از عدم گرفتگی لوله‌ها و دستگاه‌ها اطمینان حاصل کرد؛

معمولا واحدهای چند منظوره حس‌گرهایی دارند که برای خواندن، ثبت و کنترل مواردی مانند دمای جداره، فشار داخلی و افت فشار در طول ستون به کار می‌روند.

- سرعت، حساسیت و دقت واکنش دستگاه‌ها به عواملی مانند محل قرارگیری، نقاط اندازه‌گیری فشار، انجام اندازه‌گیری در خود محل و یا دور از آن، قرائت سریع و ثبت دقیق اعداد بستگی دارد. مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری باید متناسب با ظرفیت فرآیند باشد.

ب- واحد پیشاهنگ تک منظوره و یا اختصاصی

یک واحد پیشاهنگ تک منظوره فقط برای یک مدار طراحی می‌شود. در این حالت دستگاه‌های واحد پیشاهنگ و نحوه اتصال آن‌ها با یکدیگر و چگونگی عملکرد آن‌ها بسیار شبیه به مقیاس صنعتی است.

در مواردی که فرآیند مورد نظر ویژگی‌های منحصر به فردی داشته باشد، ساخت یک واحد پیشاهنگ تک منظوره ضروری است. در این موارد یک مدل واقعی از کارخانه مقیاس صنعتی کامل ساخته می‌شود. اگر چه یک واحد پیشاهنگ تک منظوره بسیار گرانتر از واحدهای پیشاهنگ چند منظوره است ولی مزایایی به شرح زیر دارد.

- افزایش مقیاس آسانتر صورت می‌گیرد. زیرا دستگاه‌ها در دو مقیاس پیشاهنگ و صنعتی شباهت بسیار زیادی به یکدیگر دارند؛

- آموزش مهندسان و سرپرستان واحد صنعتی؛

- بعد از راه‌اندازی واحد صنعتی، از واحد پیشاهنگ می‌توان برای کنترل مدار و رفع مشکلات واحد اصلی تولید استفاده کرد.

۵-۲-۲- ظرفیت واحدهای پیشاهنگ

ظرفیت بار ورودی در آزمایشگاه‌های پیشاهنگ به عوامل متعددی نظیر ضرورت‌های پروژه، ویژگی‌های ماده معدنی، ظرفیت دستگاه‌ها، تناژ مورد نیاز محصول خروجی و مشابه آن‌ها وابسته است. میزان نمونه موجود نیز از دیگر عوامل مهم در ظرفیت واحد پیشاهنگ است. در مطالعات واحد پیشاهنگ وزن نمونه‌های مورد نیاز بین چند صد کیلوگرم تا چند تن متغیر است.

وزن نمونه مورد نیاز باید در مرحله مطالعات آزمایشگاهی و مدار بسته مشخص و انتخاب شود و بر اساس آن نمونه‌گیری برای عملیات پیشاهنگ صورت گیرد.

۵-۲-۳- تجهیزات واحد پیشاهنگ

امکانات و تجهیزات مورد نیاز در یک واحد پیشاهنگ فرآوری مواد معدنی به شرح زیر است:

- سیستم‌های توزین؛

- نوار نقاله‌ها؛

- تجهیزات کنترلی و خودکار یا نیمه‌خودکارسازی فرآیند تا حد امکان با لحاظ جنبه‌های فنی و اقتصادی؛

- دبی‌سنج‌ها؛

- تجزیه کننده‌های در جریان؛
- کنترل کننده‌های سطح پالپ؛
- ابزار نمونه برداری از پالپ؛
- سیستم‌های مخلوط کننده؛
- تغذیه کننده‌ها؛
- خشک کن‌ها و کوره‌ها؛
- انواع پمپ‌ها برای وظایف مختلف؛
- مخازن آماده سازی پالپ؛
- انبارها یا مکان‌های ذخیره خوراک یا محصول؛
- تجهیزات اصلی جدایش ثقیلی (میز، جیگ، ماریچ و واسطه سنگین)؛
- انواع آسیابها بر حسب نیاز (گلوله‌ای، میله‌ای، قلوه‌سنگی، خودشکن، نیمه خودشکن، قائم و ارتعاشی)؛
- انواع سنگ شکن‌ها بر حسب نیاز (فکی، ژیراتوری، مخروطی و ضربه‌ای)؛
- تجهیزات آب گیری (تیکرها و فیلترهای فشاری و خلا)؛
- دستگاه‌های طبقه بندی (هیدروسیکلون، سیکلون هوایی، کلاسیفایرها (انواع ماریچ یا پارویی) و سرندها (ثابت و متحرک)؛
- جداکننده‌های الکتروستاتیکی؛
- جداکننده‌های مغناطیسی با شدت کم و شدت بالا (تر یا خشک)؛
- تجهیزات اصلی آزمایش فلوتاسیون (سلول‌های فلوتاسیون، سلول‌های اولیه، شستشو و رمق گیر، سلول آماده سازی، مواد شیمیایی و سایر امکانات تکمیلی نظیر pH متر و سیستم هوادهی در پالپ)؛
- تجهیزات اصلی فروشویی (تانک‌ها و مخازن فروشویی شامل همزن‌ها، مواد شیمیایی، مخازن آماده سازی، امکانات مورد نیاز در مرحله جدایش جامد و مایع، مخازن و امکانات مربوط به روش‌های فرآوری و تخلیص تجهیزات مربوط با مرحله جداسازی فلز و امکانات مربوط به روش‌های مختلف فروشویی نظیر فروشویی باکتریایی و تحت فشار)؛
- امکانات مورد نیاز برای برگشت مواد شیمیایی به سیکل آزمایش؛
- امکانات مورد نیاز برای بازیابی آب به چرخه کارخانه؛
- در نظر گرفتن اثرات زیست محیطی در محل آزمایش و بررسی عوارض حاصل از آن.

۳-۵- خصوصیات فرد یا گروه آزمایش کننده

شرایط فرد یا گروه آزمایش کننده علاوه بر داشتن شرایط ذکر شده در مقیاس‌های آزمایشگاهی و پایه باید دارای شرایط زیر نیز

باشد:

- فرد یا گروه آزمایش‌کننده باید دارای مدرک کارشناسی در رشته مرتبط با قانون نظام مهندسی معدن و تجربه حداقل ۱۰ سال کار در آزمایشگاه برای انجام آزمایش‌های فرآوری باشد؛
- استفاده از کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی به ویژه در ارتباط با آزمون‌های پیشاهنگ توصیه می‌شود؛
- فرد (گروه) آزمایش‌کننده باید قبل از انجام آزمایش، اسناد و مدارک لازم را به طور کامل و دقیق دریافت و کنترل و بعد از انجام آزمایش نیز فرم اطلاعات مربوط به هر آزمایش را تکمیل کند؛
- بسته به ساختار و چگونگی آزمایش معمولاً ۱ تا ۲ نفر متخصص و ۳ تا ۴ نفر تکنسین یا کارگر ماهر، با توجه به پیوسته بودن مراحل در این مقیاس برای انجام آزمایش‌ها مورد نیاز است؛
- در واحد پیشاهنگ دقت و تجربه فرد (گروه) آزمایش‌کننده باید بیشتر و مشخصاً دارای تجربه عملیات واحد پیشاهنگ یا صنعتی باشد. بر این اساس آشنایی فرد (گروه) آزمایش‌کننده با نرم‌افزارهای تخصصی و کنترل مدار لازم است، ضمن این که برای کنترل و جلوگیری از بروز اشکالات احتمالی، وجود یا دسترسی سریع به تخصص‌های مهندسی برق و مکانیک نیز ضروری است.

۵-۴- اسناد و مدارک، نقشه‌ها و گزارش‌های مورد نیاز مطالعات واحد پیشاهنگ

- مهم‌ترین مدارک و اطلاعات اولیه مورد نیاز در آزمایش‌های پیشاهنگ به شرح زیر است:
 - خلاصه نتایج مطالعات کانی‌شناسی و زون‌بندی کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی کانسار؛
 - گزارش بررسی قابلیت فرآوری (مطالعات اولیه و پایه آزمایشگاهی) با جزئیات کامل؛
 - شمای عملیات حاصل از نتایج آزمایشگاهی برای انجام فرآیند فرآوری نمونه کانسنگ؛
 - نتایج بررسی‌های فنی و اقتصادی در مرحله آزمایشگاهی و مدارک مبنی بر توجیه انجام فرآیند در مقیاس پیشاهنگ؛
 - اطلاعات و مدارک مربوط به طراحی شمای عملیات فرآوری در واحد پیشاهنگ؛
 - برنامه تامین تجهیزات و جانمایی آن‌ها، همچنین اطلاعات مربوط به سیستم کنترل خودکار فرآیند؛
 - اطلاعاتی درباره مقدار نمونه مورد نیاز در طول دوره آزمایش‌های واحد پیشاهنگ و همچنین نحوه دریافت محصول (یا محصول‌ها) از فرآیند؛
 - اطلاعات مربوط به بررسی‌های زیربنایی و مرتبط با محل احداث واحد پیشاهنگ و جانمایی نهایی کارخانه؛
 - اطلاعات مربوط به مقدار ذخیره ماده معدنی و گزارش‌های فنی و اقتصادی عملیات معدنکاری و قیمت تمام شده بار ورودی به کارخانه برای بررسی و تهیه گزارش فنی و اقتصادی نتایج عملیات واحد پیشاهنگ.

۵-۵- فهرست و عناوین اصلی ارایه نتایج و جداول بررسی‌های فرآوری در مقیاس واحد پیشاهنگ

در گزارش‌های واحد پیشاهنگ موارد زیر باید جزو سرفصل‌های اصلی باشد:

- الف- ویژگی نمونه (خوراک)
- ترکیب شیمیایی؛
 - ترکیب کانی شناسی؛
 - اطلاعات سنگ شناسی؛
 - درجه آزادی؛
 - قابلیت خردایش.
- ب- مطالعات آب
- وضعیت در مدار باز و بسته؛
 - بازیابی آب؛
 - مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب؛
 - منابع تامین.
- پ- نتایج مطالعات آزمایشگاهی و پایه که به عنوان مبنای کار استفاده شده است.
- آزمایش های ناپیوسته؛
 - مطالعات مدار بسته.
- ت- دستیابی به هدف مطالعات در مقیاس واحد پیشاهنگ
- انجام آزمایش ها در مقیاس واحد پیشاهنگ؛
 - تامین شرایط برای اجرای نهایی کارخانه اصلی؛
 - تکمیل اطلاعات در زمینه بررسی جوانب فنی و اقتصادی طرح.
- ث- نتایج متالورژیکی نهایی
- مقایسه نتایج مطالعات پیشاهنگ و مطالعات مدار بسته؛
 - منحنی عیار- بازیابی نهایی.
- ج- تجزیه و تحلیل جزییات مطالعات واحد پیشاهنگ
- چ- اطلاعات فنی در موارد زیر:
 - توان مصرفی مدار خردایش؛
 - مصرف برق؛
 - مصرف گاز و سوخت؛
 - موازنه جرمی مواد؛
 - موازنه آب؛

- موازنه عیار؛
- مواد شیمیایی مصرفی؛
- تحلیل تجزیه دانه‌بندی مدار؛
- سینتیک فرایندها (فلوتاسیون، خردایش و نظایر آن)؛
- آب‌گیری کنسانتره و باطله (تیکنر/ فیلتر و نظایر آن)؛
- رئولوژی باطله (خواص حرکتی باطله).
- ح- ویژگی‌های محصول پرعیار شده
 - خواص شیمیایی؛
 - ترکیب کانی‌شناسی؛
 - دانه‌بندی؛
 - درصد رطوبت؛
 - حد رطوبت قابل انتقال (حمل و نقل).
- خ- مطالعات فنی و اقتصادی در مورد احداث کارخانه
 - د- خواص پساب تولیدی از کارخانه
 - خواص شیمیایی؛
 - سمیت.
 - ذ- خواص باطله تولیدی
 - شیمیایی؛
 - کانی‌شناسی؛
 - اسیدزایی؛
 - خواص رئولوژی.
- ر- مطالعات تکمیلی در طول مطالعات واحد پیشاهنگ
 - مطالعات آزمایشگاهی؛
 - مطالعات کانی‌شناسی؛
 - مطالعات درجه آزادی.
- ز- مطالعات ویژه
 - قابلیت احتراق کنسانتره؛
 - امکان استحصال محصولات جانبی.
- ژ- بررسی نقاط قوت و ضعف واحد پیشاهنگ

فصل ۶

آزمایش‌ها در مقیاس‌های مختلف



۶-۱-۱- آزمون‌های آزمایشگاهی و پیشاهنگ برای طراحی مدار خردایش

۶-۱-۱- ضوابط آزمون‌های مقیاس آزمایشگاهی

در جدول (۶-۱) مشخصات نمونه‌ها برای آزمون‌های مختلف خردایش در مقیاس آزمایشگاهی درج شده است.

جدول ۶-۱- مشخصات نمونه مورد نیاز برای آزمون‌های مختلف خردایش

طول آسیا (m)	پیک انرژی ویژه (J/kg)	پیک انرژی (J)	نوع آزمون	وزن نمونه به کار رفته (kg)	وزن نمونه مورد نیاز (kg)	ابعاد نهایی (mm)	بزرگ‌ترین ابعاد (mm)	مشخصه
								تست
۱/۸۳	۱۸	۱۰۰	نایبسته	۴۰۰	۷۵۰	-	۱۶۵	مقاومت بار خردکننده
-	۵۰۰	۲۰۰	تک‌ذره	۵ تا ۷	سنگ‌های ۲۰، ۷۵ تا ۵۰ میلی‌متر	-	۷۵	ضربه باند
-	۱۴۰۰	۴۵۰	تک‌ذره و نایبسته	۲۴	۷۵	-	۶۴	سقوط وزنه
۰/۴۵	۷۰	۳/۳	پیوسته	۱۰۰	۱۳۵	۱۲	۳۲	مک‌فرسن خودشکن
۰/۳۰۵	۸	۰/۲	نایبسته	۲	۱۰	$P_{80}=1/7$	۲۵ $F_{80}=13$	SPI (اندیس توان نیمه خودشکن)
۰/۳۰۵	۵۰۰	۱/۶	مدار بسته	۱۰	۲۰	۱/۲	۱۳	آسیای میله‌ای باند
۰/۳۰۵	-	۰/۶	مدار بسته	۴	۱۰	۰/۱۴۹	۳/۳	آسیای گلوله‌ای باند

۶-۱-۲- ضوابط انجام آزمایش‌های واحد پیشاهنگ

آزمون‌های واحد پیشاهنگ برای تعیین توان مورد نیاز در مدارهای خردایش به کار می‌رود. در مدارهای آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن، دامنه خوراک‌دهی در آزمایش‌های پیشاهنگ به ترتیب از حدود ۱۰ تا ۳۰ کیلوگرم بر ساعت و ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلوگرم بر ساعت متغیر است. برای مدارهای آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن متغیرهای اصلی شامل بار گلوله، سرعت آسیا، میزان بار خردکننده، باز یا بسته بودن مدار آسیای نیمه‌خودشکن و توان آسیا است. هنگام طراحی برنامه واحد پیشاهنگ پارامترهای مهمی وجود دارد که باید مد نظر قرار گیرند که در جدول (۶-۲) آمده است. در جدول (۶-۳) نیز اختلاف بین آزمایش‌ها در مقیاس‌های آزمایشگاهی و پیشاهنگ برای مدارهای خردایش درج شده است.

جدول ۶-۲- پارامترهای مورد نیاز برای طراحی یک برنامه واحد پیشاهنگ

پارامتر	ملاحظات
انتخاب نمونه	با توجه به این که برای آزمایش‌های واحد پیشاهنگ حجم نمونه‌ها زیاد است، لذا طراحان آزمایش‌ها و افراد انجام‌دهنده آن‌ها باید از چگونگی کاربرد نمونه برای آزمایش پیشاهنگ متناسب با موازنه کانی اطلاع کافی داشته باشند.
تأثیرات مقیاس	بعضی از متغیرها به خوبی از پیشاهنگ به مقیاس بزرگ، تبدیل نمی‌شوند و یا به خوبی در مقیاس پیشاهنگ آزمایش نمی‌شوند (به عنوان مثال اندازه بزرگترین نمونه بار اولیه (top size) است). چون اندازه تجهیزات در مقیاس پیشاهنگ کوچکتر از مقیاس صنعتی است بنابراین اندازه بزرگترین نمونه نیز کوچکتر از مقیاس صنعتی است بنابراین برای آزمایش‌های سنگ‌شکنی اولیه معمولاً آزمایش‌های پیشاهنگ انجام نمی‌شود.
تهیه بار اولیه	تهیه بار اولیه با توزیع یکسان و d_{80} یکسان با آسیا مشکل است. بنابراین توزیع اندازه ذرات در بار اولیه آسیا باید با حالت طراحی صنعتی متناسب باشند.
ویژگی‌های بار اولیه	نمونه انتخابی برای آزمایش پیشاهنگ باید به خوبی با آزمایش‌های مقیاس پایه شناخته شده باشد. این کار باعث می‌شود تا انتخاب بهتری از وضعیت و عملیات واحد پیشاهنگ صورت گیرد.
طبقه‌بندی	تبدیل مقیاس اغلب طبقه‌بندی‌کننده‌ها به سختی صورت می‌گیرد. با توجه به تأثیر مهم طبقه‌بندی در مراحل بعدی این پارامتر باید به دقت کنترل شود.

جدول ۶-۳- مقایسه آزمایش‌ها در مقیاس‌های آزمایشگاهی و واحد پیشاهنگ برای مدارهای خردایش

عناوین	آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی	آزمایش‌ها در مقیاس پیشاهنگ
مقدار نمونه	مقدار نمونه لازم برابر ۲۵۰ کیلوگرم یا کمتر است.	مقدار نمونه تابع اندازه بزرگترین نمونه آزمایش و اندازه و ظرفیت تجهیزات مورد استفاده است.
نوع مدار	آزمایش‌ها به صورت مدار ناپیوسته، مدار بسته و بعضی نیز به صورت کاملاً پیوسته انجام می‌شود.	مدار کاملاً پیوسته و عملیات مدار همانند عملیات در مقیاس صنعتی است.

۶-۲- دانه‌بندی

نکات مورد توجه در آزمایش‌های دانه‌بندی به شرح زیر است:

- سرندها باید به نحوی انتخاب شود که وزن بخش باقیمانده بر روی بالاترین سرنده (درشت‌ترین چشمه) و همچنین وزن بخش عبور کرده از پایین‌ترین سرنده (کوچکترین چشمه) از ۵٪ کل نمونه مورد آزمایش بیشتر نشود؛
 - تکان دادن مجموعه سرندها باید با استفاده از دستگاه لرزاننده انجام شود؛
 - توزین باید با دقت بالایی انجام شود (بهتر است که از ترازوهای با دقت بیش از ۰/۱g استفاده شود)؛
 - اختلاف وزن هر دو بار پیاپی توزین مواد باقیمانده بر روی هر سرنده باید کمتر از ۰/۵ درصد باشد؛
 - منحنی مناسب دانه‌بندی انتخاب و ترسیم شود.
- روش‌های تعیین دانه‌بندی در حد کوچکتر از محدوده سرندها در جدول (۶-۴) ارایه شده است.

جدول ۶-۴- روش‌های تعیین دانه‌بندی در حد کوچک‌تر از محدوده سرندها

روش	نام دستگاه	ملاحظات
ته‌نشینی	بشر ته‌نشینی	روش طولانی و پرزحمت است، حجم آب مصرفی قابل توجه است.
	الوترياتور	تعیین دانه‌بندی مواد به کمک یک جریان رو به بالای سیالی که معمولاً آب یا هوا است.
	پی‌پت اندرسن	با استفاده از این روش دانه‌بندی مواد را در محدوده قانون استوکس تا ابعاد میکرون با دقت کافی می‌توان به دست آورد. این روش سریع‌تر و ساده‌تر از روش‌های قبل است.
نیروی گریز از مرکز	جداکننده باکو	در این روش برای هر آزمایش ۱۰ تا ۲۰ گرم نمونه لازم و مدت زمان لازم برای هر آزمایش چند دقیقه است.
	سیکلوسایزر	برای طبقه‌بندی و تعیین دانه‌بندی موادی با جرم مخصوص $2/7 \text{ g/cm}^3$ در حد ۸ تا ۵۰ میکرون و موادی با جرم مخصوص $7/5 \text{ g/cm}^3$ تا حد ۴ میکرون به کار می‌رود.
	سانتریفوژ	می‌توان دانه‌بندی مواد را در مدت زمان بسیار کوتاه‌تر و تا ابعاد کوچکتر بدست آورد.
اندازه‌گیری سطح مخصوص	-	برای اندازه‌گیری سطح مخصوص مواد، روش‌های مختلفی وجود دارد که با استفاده از این روش‌ها، اصول کار دستگاه‌ها تعیین می‌شود. از جمله روش‌های اندازه‌گیری سطح مخصوص روش جذب سطحی گاز (روش BET) است.
اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی	Coulter Counter	این دستگاه سرعت و دقت زیادی دارد.
تفرق اشعه لیزر	جداکننده لیزری	این روش بر مبنای تفرق اشعه لیزر توسط دانه‌های جامد پایه‌گذاری شده است. از این روش برای تعیین دانه‌بندی مواد از ۰/۱۶ تا ۱۱۶۰ میکرون استفاده می‌شود.

۶-۲-۱- آزمایش‌های سرند کردن در مقیاس واحد پیشاهنگ

برای انجام آزمایش‌ها در مقیاس پیشاهنگ به طور کلی از دستگاه‌های مقیاس صنعتی با همان ویژگی‌ها و شرایط استفاده می‌شود. برای انتخاب نوع سرند و نحوه کاربرد آن در مقیاس پیشاهنگ، موارد زیر باید مد نظر قرار گیرد:

الف- خصوصیات ماده معدنی

- نوع ماده معدنی و فرمول شیمیایی آن؛

- توزیع ابعادی مواد؛

- جرم مخصوص؛

- درصد رطوبت؛

- شکل دانه‌ها؛

- خواص سایندگی ماده معدنی؛

- زاویه قرار ذرات.

ب- شمای عملیات به دست آمده با توجه به مطالعات مراحل قبلی

پ- نوع عملیات سرند کردن:

- روش خوراک‌دهی و جمع‌آوری محصول؛

- میزان دقت در جداسازی ابعادی؛

- دسترسی آسان به سرندها برای نگهداری تعمیرات احتمالی.

ت- هدف از سرند کردن:

- طبقه‌بندی ابعادی؛

- آب‌گیری؛

- نرمه‌گیری؛

- پر عیارسازی.

۶-۲-۲- انواع سرندها

سرندهای به کار رفته در آزمایش‌های پیشاهنگ از نظر شکل و نوع همانند مقیاس صنعتی هستند و تنها اختلاف در اندازه و ظرفیت آن‌ها است و همانند مقیاس صنعتی به دو دسته سرندهای ثابت و متحرک تقسیم می‌شوند. جدول (۶-۵) نوع سرندها و کاربردهای موثر آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۵- انواع سرندها و کاربردهای آن‌ها

نوع سرند	نام سرند	مشخصات سرند و پارامترهای موثر	کاربرد
ساکن	گریزلی	- سرند میله‌ای - جنس میله‌ها فولاد منگنزدار - شیب ۲۰ تا ۵۰ درجه	- طبقه‌بندی مواد دانه درشت - حد جدایش تا ۲۰۰ میلی‌متر - طبقه‌بندی بار اولیه در مرحله باردهی به سنگ‌شکن اولیه - جدا کردن قطعات درشت‌تر از دهانه و کوچکتر از گلوگاه سنگ‌شکن
	سرندهای قوسی (Sieve - Bend Screen)	- بر خلاف دستگاه‌های ثقلی و سانتریفوژ مستقل از جرم مخصوص است. - حد جدایش ذرات متاثر از گرانش و کنسانتره‌های خوراک ورودی نیست.	- برای جدایش ۰/۱ تا ۱۲ میلی‌متر - درصد جامد بار ورودی بیش از ۴۵٪
متحرک	سرند ارتعاشی (Vibrating Screen)	- دارای سطوح افقی یا شیب‌دار - حرکت در صفحه قائم - نوع شیب‌دار دارای ظرفیت بالایی است. - در نوع افقی دقت و کارایی بالاتر است.	-
	سرند نوسانی (Oscillating Screen)	- حرکت به صورت افقی و با سرعت ۱۰۰ تا ۴۰۰ دور در دقیقه	- برای ابعاد ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) و کمتر قابل کاربرد است.
	سرند لرزان (Shaking Screen)	- ظرفیت کم - نیاز به نگهداری زیاد - سرعت ۲۰ تا ۳۰۰ دور در دقیقه	- دانه‌بندی در حدود ۱۲ میلی‌متر - مناسب برای دانه‌بندی‌های دقیق ذرات نسبتاً بزرگ
	سرند سانتریفوژ (Centrifugal Screen)	-	- آب‌گیری زغال و شن و ماسه
	سرند گردان (Revolving Screen)	- ظرفیت کم - استوانه‌ای شکل با شیب ملایم	- برای دانه‌بندی شن و ماسه تر

نکات قابل توجه در عملیات سرند کردن در مقیاس پیشاهنگ به شرح زیر است:

- طراحی سطوح سرند باید به گونه‌ای انجام گیرد که انتقال موثر ارتعاش از مرکز اصلی به سطوح و از آن به مواد در حال طبقه‌بندی امکان‌پذیر باشد؛
- تنظیم از ارتعاش، سرعت، دامنه نوسان و شیب سرند باید به نحوی باشد تا مواد، ضمن مخلوط شدن کامل در سطح سرند به راحتی در سطح سرند جریان یابند. اگر دامنه نوسانات زیاد باشد، لایه‌بندی مطلوب انجام نمی‌گیرد و احتمال این که ذرات نزدیک چشمه سرند تماس مناسبی با چشمه سرند داشته باشند و به راحتی از چشمه سرند عبور کنند، بسیار کم خواهد بود. اگر دامنه نوسانات به اندازه کافی نباشد، احتمال گرفتگی چشمه سرند زیاد است؛
- ارتعاش باید به طور یکنواخت در سطح سرند توزیع شود تا پرتاب ذرات در محدوده مجاز انجام شود و تحت تاثیر تنش‌های اضافی و بیش از حد واقع نشود؛
- در سرند کردن به روش تر، نسبت آب به جامد باید در محدوده دو به یک باشد و فشار آب باید به حالت کنترل شده و یکنواخت در سطح سرند توزیع شود؛
- در طرح جانمایی تجهیزات باید به مسایل نگهداری و تعویض قطعات نیز توجه داشت.

۶-۳- کلاسیفایرها (طبقه‌بندی‌کننده‌ها)

طبقه‌بندی مواد در ابعاد کوچک به روش مستقیم (سرند کردن) بازدهی مناسبی ندارد، لذا برای طبقه‌بندی این مواد باید از روش غیرمستقیم استفاده کرد. در این روش، مخلوطی از دانه‌های جامد با ابعاد مختلف در کلاسیفایر بر مبنای سرعت نسبی حرکت دانه‌ها در یک سیال، به بخش‌هایی با ابعاد مشخص تقسیم می‌شود. در فرآوری، سیال مورد استفاده معمولاً آب یا هوا است. باید به این نکته توجه کرد که علاوه بر ابعاد، عوامل دیگری از قبیل جرم مخصوص دانه‌های جامد، مقاومت سیال در مقابل حرکت آن‌ها (که خود تابعی از ابعاد، شکل دانه‌ها و مشخصات سیال است) نیز بر روی حرکت دانه‌ها در سیال تاثیر می‌گذارند.

۶-۳-۱- آزمایش‌های طبقه‌بندی در مقیاس واحد پیشاهنگ

معمولاً مطالعات طبقه‌بندی مواد در آزمایشگاه و واحد پیشاهنگ برای طراحی مدار در مقیاس صنعتی به کار نمی‌رود. زمانی که کلاسیفایرها برای کاربردهای دیگری مانند شستشو، آب‌گیری و نرمه‌گیری به کار می‌روند، آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین کارایی عملیات لازم است. کلاسیفایرهای مکانیکی برای جدایش‌های ۲۰ تا ۲۰۰ مش و سیکلون‌ها برای جدایش تا حد ۴۰۰ مش و در برخی موارد بسته به دقت خوراک در ابعاد ریزتر استفاده می‌شوند.

تجهیزاتی که برای طبقه‌بندی مواد در مقیاس واحد پیشاهنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند همانند تجهیزات مقیاس صنعتی ولی با ابعاد کوچکتر هستند. در جدول (۶-۶) مشخصات انواع کلاسیفایرها ارائه شده است.

جدول ۶-۶ مشخصات انواع کلاسیفایرها

نوع کلاسیفایر	نام	مشخصات دستگاهی	کاربرد
کلاسیفایرهای آبی با جریان قائم	stokes	- برای تهیه بار اولیه جداکننده‌های ثقلی	
	مخروطی	- زاویه راس ۶۰ درجه - بازدهی کم	- در مواردی که بازدهی زیاد مورد نظر نباشد.
	Fahrenheit	- قسمت تحتانی متخلخل است.	
	Rheax	- مخروطی شکل - مصرف زیاد آب و رقت بیش از حد سرریز	
کلاسیفایرهای آبی با جریان افقی	Setting Cone	- حداکثر ظرفیت ۲۰۰ تن در ساعت - تنظیم اتوماتیک دریچه تخلیه ته‌ریز متناسب با میزان مواد دانه‌درشت	- جدا کردن جامد از مایع - در صنایع ماسه‌شویی برای جدا کردن رس و سایر مواد دانه ریز همراه ماسه
	(Rake classifier) کلاسیفایر پارویی	- غلظت ته‌ریز ۷۰ درصد - غلظت سرریز ۱۰ تا ۴۰ درصد - حد جدایش ۰/۸ تا ۰/۶ میلی‌متر	- مسیرهای بسته آسیا کردن - شستشوی مواد معدنی
	کلاسیفایر مارپیچی (Spiral Classifier)	- بازدهی بالا نسبت به کلاسیفایر پارویی	- طبقه‌بندی مواد تا حدود ۷۵ میکرون
	کلاسیفایر جامی (Bowl Classifier)		- طبقه‌بندی مواد در حد کوچکتر از کلاسیفایرهای پارویی و یا ظرفیت‌های بیشتر - نرمة‌گیری مواد (با ایجاد مجرای در انتهای ظرف مخروطی برای ورود آب)
	کلاسیفایر نوسانی (Hydro Oscillator)	- قیمت نسبتاً زیاد	- نرمة‌گیری - در مورد پالپی متشکل از دانه‌های کوچکتر از ۲۰۰ میکرون به عنوان یک تیکتر عمل می‌کند.
	هیدروسیکلون	قطر سرریز و ته‌ریز و زمان توقف ذرات فشار سرریز و ته‌ریز	- طبقه‌بندی و نرمة‌گیری در مدارهای مختلف - پرعبارسازی در بعضی از مواد معدنی از جمله کائولن
کلاسیفایر آبی با جریان دورانی	سانتریفوژ		- طبقه‌بندی در حد کوچکتر از ۱۰ میکرون - جدا کردن مایع از جامد
	Birtley	- ظرفیت زیاد و ساده - بازدهی کم	- حد جدایش ۰/۸ تا ۱/۲ میلی‌متر - جدا کردن گرد و غبار از محصولات دانه درشت
کلاسیفایرهای هوایی	الوتریاتور هوایی (Alpine)		- حد جدایش ۰/۸ تا ۱۰ میلی‌متر - جدا کردن موادی با ابعاد مشابه و جرم مخصوص‌های متفاوت و یا موادی با ابعاد چگالی‌های مشابه ولی شکل متفاوت
	سیکلون هوایی	- ظرفیت زیاد - بازدهی کم	- حد جدایش ۵ تا ۵۰ میکرون
	Saint- Jacques	- طبقه‌بندی مواد در چند مرحله و بازدهی بالا - مصرف انرژی زیاد و احتیاج به فضای بزرگ	- حد جدایش ۱۵ تا ۳۰ میکرون
	Whitter	- حد جدایش قابل تنظیم	- حد جدایش ۵ تا ۱۰ میکرون - کاربرد عمده در صنایع سیمان
	Microplex	- ظرفیت ۱ تا ۶ تن - بازدهی زیاد	- حد جدایش ۸ تا ۶۰ میکرون (انواع صنعتی) - حد جدایش ۲ تا ۲ میکرون (نمونه‌های کوچکتر)

۶-۴- جدایش ثقلی

روش‌های جدایش ثقلی مواد معدنی بر مبنای حرکت نسبی آن‌ها در یک محیط سیال پایه‌گذاری شده است. نیروی موثر عمدتاً وزن دانه‌ها و نیروی دیگر، مقاومت سیال (مثل آب یا هوا) در برابر حرکت جسم است که به ابعاد و شکل دانه‌ها بستگی دارد. برای آن که بتوان دو ماده معدنی را به طور موثر از هم جدا کرد لازم است بین جرم مخصوص آن‌ها اختلاف قابل توجهی وجود داشته باشد. این روش‌ها برای فرآوری بسیاری از مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دامنه کاربرد آن‌ها وسیع است. روش‌های ثقلی نسبت به نرمه بسیار حساس‌اند، زیرا این دانه‌ها باعث افزایش گرانروی محیط و در نتیجه کاهش دقت جدایش می‌شوند. بنابراین دقت در تهیه بار اولیه برای روش‌های ثقلی اهمیت زیادی دارد. زیرا در عملیات خرد کردن باید ضمن دستیابی به درجه آزادی مناسب، محصول خرد شده تا حد امکان دانه درشت باشد. انواع روش‌ها، پارامترها، کاربردها و ملاحظات روش‌های مختلف جدایش ثقلی در جدول (۶-۷) ارائه شده است.

جدول ۶-۷- مشخصات روش‌های مختلف جدایش ثقلی

روش	مکانیزم، ابزار جدایش	نمونه	عوامل، پارامترها	محدودیت‌ها، مزایا	کاربردها	ملاحظات
میز لرزان	جدایش در لایه نازک آب. میز معمولی و میز نرمه (Sand table) و (Slime table)	حداکثر ابعاد ذرات برای زغال تقریباً ۲ سانتی‌متر و برای سایر مواد معدنی ۱۰ میس است. جدایش خاکستر با ابعاد حداکثر ۲۰۰ میس و جدایش پیریت آزاد در ابعاد حداکثر ۳۲۵ میس از زغال سنگ امکان‌پذیر است. در مورد مواد معدنی با جرم مخصوص زیاد، حداقل ابعاد ذرات قابل جدایش کمتر از ۳۲۵ میس است.	درصد جامد وزنی پالپ حدود ۲۵ درصد، ابعاد میز، فرکانس حرکت نوسانی (معمولاً ۲۴۰ تا ۳۲۵ نوسان در دقیقه، متناسب با ابعاد ذرات)، دامنه حرکت نوسانی (۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر)، شیب عرضی میز (متناسب با خط جدایش)، دبی آب شستشو و خوراک‌دهی، مرحله جدایش (رافر / کلینر)، شکل دانه‌ها و ذرات مواد معدنی، اختلاف جرم مخصوص کانی‌های سنگین و سبک، ابعاد ذرات	برای شستشوی زغال و پریارسازی کانی‌های غیرفلزی و غیرسولفیدی، همچنین برخی کاربردهای ویژه نظیر بازیابی فلزات پایه و با ارزش از محصولات خردایش ثانویه، سرباره‌ها و نظایر آن‌ها	میز لرزان برای پریارسازی کانسنگ‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد: زغال سنگ (تناژ بالا)، باریت، ماسه‌های ساحلی، کرومیت، ماسه سیلیسی، گارنت، آهن، منگنز، میکا، فسفات، پتاس، تانتالیم، قلع، تیتانیوم، تنگستن، زیرکن	در مورد ذرات با شکل مشابه اختلاف حداقل ۱ واحد بین جرم مخصوص کانی با ارزش و باطله برای جدایش موثر به وسیله میز ضروری است. ظرفیت خوراک‌دهی میز به جرم مخصوص، ابعاد و مرحله جدایش (رافر یا کلینر) بستگی دارد، ظرفیت میز نرمه تا ۰/۱ تن بر ساعت در هر سیکل قابل استفاده است. برای مواد دانه ریز و نرمه نوسانات میز ۲۵ تا ۲۸۵ دور در دقیقه توصیه می‌شود.

ادامه جدول ۶-۷- مشخصات روش‌های مختلف جدایش ثقلی

روش	مکانیزم، ابزار جدایش	نمونه	عوامل، پارامترها	محدودیت‌ها، مزایا	کاربردها	ملاحظات
روشن مایع سنگین، چگال، که در بر گیرنده تجهیزاتی شامل: میز هوایی، سیکلون واسطه حمام سنگین واسطه سنگین (Dense Media Bath) و نظایر آن‌ها است.	جدایش مواد معدنی با اختلاف جرم مخصوص مشخص در محیط یک سیال با جرم مخصوص حد واسطه ذرات با ارزش، باطله و اختلاف در سرعت ته‌نشینی ذرات در محیط سیال، جداکننده‌های دایناویروپول و وُرسیل از انواع دستگاه‌های مورد استفاده در این روش هستند که بر مبنای گریز از مرکز کار می‌کنند.	حداکثر ابعاد ذرات قابل جدایش با این روش (۶ تا ۸ اینچ) ۱۵/۲۴ تا ۲۰/۳۲ سانتی‌متر است. ذرات درشت‌تر از حدود ۱۰ مش به روش "Static bath" و ذرات ریزتر از آن در سیکلون واسطه سنگین می‌شوند. نمونه مورد نظر برای آزمایش با سرنده لرزان و روش تر طبقه‌بندی می‌شود تا حتی‌الامکان مواد نرمه از آن جدا شود.	آماده‌سازی خوراک و حذف نرمه قبل از آزمایش، سایر پارامترها بستگی به نوع دستگاه مورد استفاده دارد، به طور مثال در سیکلون واسطه سنگین، این پارامترها شامل قطر سیکلون، فشار خوراک‌دهی، زاویه راس سیکلون، ابعاد دهانه‌های سیکلون و درصد جامد پالپ از پارامترهای عملیاتی مستقل از ویژگی‌های ماده معدنی هستند. درصد جامد پالپ خوراک، جرم مخصوص حد جدایش را تعیین می‌کند.	جدایش مطلق دو ذره از یکدیگر، امکان تغییر سریع جرم مخصوص جدایش متناسب با نیاز، امکان خارج کردن پیوسته محصولات، امکان کار بر روی محصولات در محدوده ابعادی وسیع، سادگی در آغاز و اتمام آزمایش بدون کاهش کارایی فرآیند، هزینه‌های نسبتاً کم محیط جدایش و اتلاف اندک، هزینه‌های کم عملیاتی و نگهداری، ظرفیت بالا ضمن اشغال کم فضا، هزینه سرمایه نسبتاً کم در هر تن ظرفیت، محدودیت‌های استفاده از مایعات سنگین آلی در کاربرد صنعتی آن، به شرح زیر است: نیاز به خشک بودن نسبی ذرات خوراک، سمی بودن، گران‌قیمت بودن و تا حدودی خورنده بودن مایعات سنگین، نیاز به تبخیر یا تراکم مایع جداکننده برای بازیابی تقریباً کامل آن، نیاز به بسته بودن محیط آزمایش، مشکل جداسازی کامل مایعات سنگین از ذرات و نظایر آن‌ها	شستشوی زغال و پرعبارسازی سنگ آهن، کانسنگ سرب و روی، کرومیت، کانسنگ‌های منگنز، قلع و تنگستن، فلدسپات‌ها، منیزیت، سیولیت، گارنت، الماس، شن و ماسه و نظایر آن‌ها. در این کاربردها، روش مایع سنگین برای تولید یک یا دو کنسانتره نهایی یا یک کنسانتره اولیه به کار می‌رود. مهم-ترین کاربرد این روش، شستشوی زغال و پیش‌فرآوری کانسنگ‌ها و حذف ذرات درشت باطله است.	از مواد آلی صرفاً به عنوان مایعات حد واسطه در روش‌های جداسازی مایع سنگین در آزمایشگاه استفاده می‌شود، زیرا این مواد گران‌قیمت‌اند. در مواردی که مایع سنگین در دسترس نباشد از مخلوط معلق حاوی ذرات کوچک‌تر از حدود ۳۲۵ مش مواد معدنی نظیر منیتیت با درصد جامد مناسب به عنوان حد واسطه یا محیط جدایش استفاده می‌شود. کلرید کلسیم متداول‌ترین نمک مورد استفاده در تهیه محلول واسطه است که جرم مخصوص نسبی جدایش آن حدود ۱/۴ تا ۱/۶ است. سایر مواد جامد مورد استفاده در تهیه مایع سنگین، شیل، کوارتز، باریت، فروسیلیکون، گالن و سرب هستند.
جیگ	ته‌نشینی با مانع، جیگ‌های امروزی از نوع سرنده ثابت هستند. دانه‌بندی نمونه محدودتر باشد، کانی‌های با اختلاف جرم مخصوص کمتر را می‌توان از یکدیگر جدا کرد (مثلاً فلورین از کوارتز).	جیگ‌ها معمولاً برای جدایش ذرات درشت مناسب‌اند. هر چه بازه دانه‌بندی نمونه محدودتر باشد، کانی‌های با اختلاف جرم مخصوص کمتر را می‌توان از یکدیگر جدا کرد (مثلاً فلورین از کوارتز).	سرعت یا فرکانس نوسانات دبی آب، نرخ خروج محصول، استفاده یا عدم استفاده از مواد دانه درشت (گلوله‌های فلزی) برای جداسازی بهتر مواد دانه‌ریز سنگین در نمونه	ساختمان ساده و ارزان، نگهداری و عملیات آسان و تا حدودی تأثیر ناپذیر از تغییرات عیاری در خوراک	بیشتر به عنوان تهیه پیش‌کنسانتره استفاده می‌شوند. برای پرعبارسازی مواد معدنی زیر به کار می‌رود: کاستریت، شلیت، طلا، منگنز، سرب و روی، آهن، زغال سنگ، الماس، باریت، باطله‌های فلزی صنعتی و انواع کانی‌های سنگین که نرمه زیادی تولید نمی‌کنند.	جیگ‌های مورد استفاده در پرعبارسازی اولیه کانسنگ‌های فلزات پایه بازیابی بالایی را دارند. معمولاً کاربرد توام روش ثقلی جیگ با روش‌هایی که تولید محصول پرعبار می‌کنند نظیر جدایش مغناطیسی با شدت بالا، فلوتاسیون یا هیدرومتالورژی مفید واقع می‌شود.

ادامه جدول ۶-۷- مشخصات روش‌های مختلف جدایش ثقلی

روش	مکانیزم، ابزار جدایش	نمونه	عوامل، پارامترها	محدودیت‌ها، مزایا	کاربردها
روش‌های قدیمی لایه نازک مایع: - جعبه‌های ثابت شامل میز گرد گردان - جعبه‌های متحرک مانند پرعیارکننده دَنور - بوکمن - ونرها مانند: پرعیارکننده بارتلز کراسپلت و بارتلز - موزلی - ناوک‌ها مانند: پرعیارکننده ریچرت و ماریچ همفری - Strakes مانند پرعیارکننده جانسون، پرعیارکننده نواری و میز صفحه‌ای	جریان ساده لایه نازک مایع	حداقل ابعاد ذرات قابل جدایش $10\mu\text{m}$ است. ماریچ همفری: برای جدایش ذرات در ابعاد ۱۴ تا ۲۰۰ مش مناسب است، که در مورد سنگ آهن تا حد ۸ الی ۱۰ مش نیز می‌رسد. جرم مخصوص پالپ معمولا بین ۲۰ تا ۳۰ درصد وزنی جامد، و دبی خوراک دهی ۰/۵ تا ۲/۵ تن در هر دستگاه در ساعت و متناسب با ابعاد خوراک است.	بستگی به نوع روش به کار رفته دارد به طور کلی پارامترهایی نظیر فرکانس و دامنه نیروهای برشی ایجاد شده، سرعت یا دبی پالپ و آب شستشو، زمان توقف ذرات، نحوه جمع‌آوری کنسانتره، باطله و حد واسط از مهم‌ترین پارامترهای موثر در جدایش ثقلی به این روش‌ها است.	هزینه‌های پایین عملیاتی، تولید یک کنسانتره کلی و حجیم از مواد با جرم مخصوص بالا از رسوبات آبرفتی و ماسه‌های ساحلی کم‌عیار	مقایسه کارایی این روش‌ها برای ذرات ریزتر از ۴۰ میکرون بسیار مشکل است. پرعیارکننده بوکمن برای تولید کنسانتره اولیه (رافر) در دو مرحله و قبل از میز نرمة مناسب است. میزهای گرد چوبی برای فرآوری مجدد باطله پرعیارکننده بوکمن مناسب‌اند. جداکننده موزلی مزیت بیشتری نسبت به میزهای گرد دارد، زیرا سطح تماس بیشتری را فراهم می- سازد. پرعیارکننده بارتلز - کراسپلت برای کنسانتره اولیه حاصل از موزلی مناسب است. معمولا ترکیب موزلی با بوکمن و مرحله کلینر در ونرها مفید واقع می‌شود. در مورد ذرات نسبتا درشت (تقریبا ۱۰مش) ماریچ‌ها و ناوک‌های pinch و مخروط ریچرت مناسب‌اند. ماریچ همفری برای پرعیارسازی ماسه‌های ساحلی و مخروط ریچرت در مرحله رافر مناسب‌اند. ماریچ در مورد قلع و تنگستن کم‌عیار برای ذرات درشت تا ابعاد ۳۲۵ مش مناسب است. در مورد کانسنگ طلا، پرعیارکننده جانسون، نواری، میز صفحه‌ای ارزان‌تر و آسان‌تر و کاربرد آن‌ها ساده‌تر است.

۶-۵- جدایش مغناطیسی و الکتروستاتیکی

مهم‌ترین خاصیت مغناطیسی کانی‌ها در فرآوری، ضریب القایی مغناطیسی آن‌ها است که بر این اساس کانی‌ها را به سه دسته فرومغناطیس، پارامغناطیس و دیامغناطیس تقسیم‌بندی می‌کنند. با توجه به تفاوت در خاصیت مغناطیسی کانی‌ها، جداکننده‌های مغناطیسی با شدت کم و زیاد ساخته شده‌اند که هر یک از آن‌ها خود به انواع خشک و تر تقسیم می‌شوند. جداکننده‌هایی که شدت میدان مغناطیسی آن‌ها کمتر از ۰/۲ تسلا باشد، جداکننده‌های با شدت کم نامیده می‌شوند. از این جداکننده‌ها برای جداکردن مواد فرومغناطیس مثل آهن و منیتیت و از جداکننده‌های با شدت میدان مغناطیسی زیاد برای جدا کردن مواد پارامغناطیسی مثل هماتیت استفاده می‌شود. میدان‌های مغناطیسی با شدت کمتر از ۱ تا ۱/۵ تسلا را میدان‌های با شدت متوسط و در بیشتر از این مقادیر را میدان‌های با شدت زیاد می‌نامند.

عموما روش‌های مغناطیسی برای جدا کردن کانی‌های مغناطیسی از غیرمغناطیسی و یا برای بازیابی واسطه سنگین (عموما جداکننده‌های واسطه سنگین) مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از نیروهای ناشی از باردار شدن یا قطبی شدن دانه‌های جامد در یک میدان الکتریکی، می‌توان مواد معدنی را فرآوری کرد.

در این روش‌ها با تنظیم نیروهای الکتریکی و نیروهای جنبی مانند نیروی ثقل و نیروی گریز از مرکز، دانه‌ها مسیرهای مختلفی را طی می‌کنند و به این ترتیب می‌توان آن‌ها را از یکدیگر جدا کرد. اگر جدایش دانه‌ها با هوا انجام شود به آن جدایش الکترواستاتیکی گفته می‌شود و در صورتی که از تخلیه کرونا استفاده شود به آن جدایش فشار قوی یا جدایش الکتریکی می‌گویند. روش‌های جدایش الکترواستاتیکی عموماً برای آرایش کانی‌هایی مانند ایلمنیت، روتیل، زیرکن، آپاتیت، هماتیت و نظایر آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۶-۵-۱- جدایش مغناطیسی

در جدول (۶-۸) انواع روش‌های مغناطیسی، کاربردها و پارامترهای مهم درج شده است. همچنین در جدول (۶-۹) نیز انواع دستگاه‌های مغناطیسی و پارامترهای عملیاتی و دستگاهی مربوطه درج شده است.

جدول ۶-۸- انواع روش‌های مغناطیسی، کاربردها و پارامترهای مربوطه در مقیاس‌های مختلف

ملاحظات	کاربرد آزمایش		مشخصات نمونه	مقیاس
	جداکننده مغناطیسی	جداکننده لوله دیویس		آزمایشگاهی و پایه
- هر دو جداکننده قابلیت، کنترل و انتخاب بالایی دارند.	- برای تعیین مقدار کانی‌های پارامغناطیس - متغیرهای کنترلی عبارتند از: شدت میدان مغناطیسی، شیب و سرعت خوراک‌دهی	- برای تعیین کانی‌های فرومغناطیس - برای بررسی عملکرد جداکننده‌های مغناطیسی استوانه‌ای مربوط در صنایع سنگ آهن و موارد استفاده بازیابی واسطه سنگین به کار می‌رود.	- وزن ۱۰ تا ۵۰ گرم - ابعاد ریزتر از ۱ میلی‌متر	
- آزمایش‌های واحد پیشاهنگ باید تا حد ممکن مشابه فرآیند واحد صنعتی باشند. - هدف از انجام آزمایش‌های واحد پیشاهنگ، برآورد تقریبی از محصول تولیدی کارخانه است - ویژگی‌هایی که حین انجام آزمایش‌های واحد پیشاهنگ باید ارزیابی شوند، عبارتند از: - قابلیت مغناطیسی شدن - تغییرپذیری کانه - درصد و میزان رطوبت - بازیابی - دما - کانی‌ها (هم‌پوشانی قابلیت مغناطیسی شدن) - ویژگی‌های دستگاه‌های جداکننده که در آزمایش‌های واحد پیشاهنگ بررسی می‌شوند، عبارتند از: - شدت میدان مغناطیسی - ظرفیت مغناطیسی - گرادیان مغناطیسی	HGMS ^۲ جداکننده مغناطیس با گرادیان بالا	WHIMS ^۱ جداکننده مغناطیسی تر با شدت بالا	متناسب با روش	واحد پیشاهنگ
	- به صورت ناپیوسته - اندازه ذرات ریز هستند. - ذرات بار اولیه باید کاملاً جدا از هم باشند.	- به صورت پیوسته - مقدار میدان مغناطیسی حداقل ۸۰۰۰ گوس - بار اولیه زیر ۳۵ مش و حداکثر ذرات جامد ۴۰ درصد		

1. Wet High Intensity Magnetic Separators
2. High Gradient Magnetic Separator

جدول ۶-۹- جداکننده‌های مغناطیسی، کاربردها و پارامترها

روشنی/دستگاه	پارامترهای دستگاهی و عملیاتی	کاربرد	ملاحظات
جداکننده مغناطیسی استوانه‌ای (شدت پایین)	شدت میدان مغناطیسی نرخ بار ورودی سرعت استوانه اندازه ذرات	جدا کردن کانی‌های فرومغناطیس و یا حذف ذرات آهنی از مسیر کانی‌های دیگر	- افزایش شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش نیروی جذب ذرات در مقابل نیروی گریز از مرکز می‌شود. - با افزایش مقدار بار ورودی، ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده سطح استوانه افزایش می‌یابد و این امر باعث کاهش کیفیت محصول می‌شود. - با افزایش سرعت استوانه لایه تشکیل دهنده روی استوانه کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان جدایش ذرات افزایش می‌یابد. - اندازه مناسب ذرات باید متناسب با شدت میدان مغناطیسی و نیروی گریز از مرکز باشد.
جداکننده‌های مغناطیسی استوانه‌ای نادر خاکی خشک (شدت بالا)		بازیابی ایلمنیت از کنسانتره‌های کانی‌های سنگین، جدایش ایلمنیت آهن بالا از ایلمنیت آهن پایین، بازیابی و جمع‌آوری هماتیت - کانی آهن، بازیابی پیروتیت، جمع‌آوری هماتیت اسپیکولار از کنسانتره‌های ثقیل، بازیابی نیکل فلزی باقی‌مانده، حذف ترکیبات خرد مغناطیس و پارامغناطیس	جداکننده‌های مغناطیسی شدت بالای نادر خاکی برای جدایش بسیاری از کانی‌های پارامغناطیس به کار می‌روند.
جداکننده مغناطیسی نواری نادر خاکی خشک (شدت بالا)	شدت میدان مغناطیسی، آهنگ بار اولیه، سرعت چرخش و توزیع اندازه ذرات	پاک‌سازی کروندوم برای استفاده در ساینده‌ها و مواد مقاوم، پاک‌سازی کروندوم صفحه‌ای برای استفاده در سرامیک‌ها، بازیابی و حذف کانی‌های مغناطیسی برای مواد اولیه تولید شیشه، بازیابی گارنت از سنگ میزبان، بازیابی ایلمنیت، بازیابی ولاستونیت از باطله‌های گارنت، شستشوی مغناطیسی کوارتز، بازیابی کنسانتره الماس از سنگ میزبان	
جداکننده مغناطیسی نواری القایی خشک (شدت بالا)		بیشتر در مورد ماسه‌های ساحلی و کانی‌های صنعتی	
جداکننده مغناطیسی استوانه‌ای تر (شدت بالا)	- شدت میدان مغناطیسی - ظرفیت هیدرولیکی بار ورودی - درصد ذرات جامد - درصد کانی‌های مغناطیسی	صنایع آهن و واسطه سنگین بازیابی کانی‌های مغناطیسی از پلاسره‌های طلا و پیروتیت از کانی‌های سولفیدی	میزان بازیابی ذرات مغناطیسی که با افزایش باردهی تا میزان مشخصی افزایش می‌یابد، پس از آن در یک حد آستانه‌ای، میزان بازیابی کاهش خواهد یافت.
جداکننده مغناطیسی استوانه‌ای نادر خاکی شدت بالای تر		بازیابی هماتیت موجود در ترکیبات و انادیم، کانی‌های آهن، بازیابی پیروتیت و ایلمنیت از کنسانتره‌های کانی‌های سنگین	
جداکننده‌های مغناطیسی تر با شدت بالا (WHIMS) و جداکننده‌های مغناطیسی تر با گرادیان بالا (HGMS)	سرعت باردهی پالپ، ابعاد ذرات، گرانروی سیال، ضریب القایی مغناطیسی، شعاع استوانه، شدت میدان مغناطیسی استوانه	برای جدایش مواد پارامغناطیس خصوصاً هماتیت به کار می‌رود (در مورد کانسنگ‌های آهن هماتیته به عنوان کنسانتره و در مورد فرآوری فلدسپات، کوارتز و نظایر آن‌ها)	تنظیم سرعت پالپ ورودی و آب شستشو، تنظیم شدت میدان مغناطیسی مناسب و دانه‌بندی ذرات

۶-۵-۲- جدایش الکتروستاتیکی

روش جدایش الکتروستاتیکی تنها برای فرآوری تعداد محدودی از کانی‌ها به طور موثر به کار برده می‌شود. جداکننده‌های الکتروستاتیکی برای جدا کردن کانی‌های با هدایت الکتریکی متفاوت از ماسه‌های ساحلی استفاده می‌شود. عوامل موثر در این جداکننده‌ها به شرح زیر است:

۱. دما؛
۲. رطوبت؛
۳. سرعت روتور؛
۴. شدت میدان الکتریکی؛
۵. اندازه ذرات؛
۶. توزیع دانه‌بندی مواد؛
۷. تیزی سطح ذرات.

توضیح پارامترهای موثر که در روش الکتروستاتیکی باید مد نظر قرار گیرند به شرح جدول (۶-۱۰) است.

جدول ۶-۱۰- پارامترهای موثر در روش الکتروستاتیکی

پارامترها	عوامل موثر در پارامتر	تأثیرات
پارامترهای مربوط به نمونه	آزادسازی کانی‌ها	باید بار اولیه دقیقاً خرد شود تا ذرات در حد امکان از یکدیگر جدا شوند.
	تمیز کردن سطح ذرات	شستشو با آب با استفاده از ساینده‌های مکانیکی
	شرایط فیزیکی	دما بر روی رسانایی الکتریکی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تأثیرگذار است.
	رطوبت	باعث تغییر رسانایی سطحی ذرات می‌شود بنابراین در جدایش الکتروستاتیکی، خشک بودن بار اولیه مهم است.
	رسانایی	با توجه به ناخالصی‌های موجود در ترکیبات کانی‌ها و شرایط فیزیکی ممکن است تغییرات در رسانایی بعضی کانی‌ها حاصل شود.
	توزیع اندازه ذرات	اندازه ابعاد ذرات باید متناسب با اندازه و ابعاد دستگاه باشد. اگر محدوده ذرات وسیع باشد ذرات به بخش‌های مختلف ابعادی تقسیم می‌شوند.
پارامترهای دستگاهی و عملیاتی	وضعیت الکتروود	فاصله از روتور و زاویه الکتروود
	ویژگی‌های سطوح جداکننده محصول	بر روی میزان عیار و بازیابی محصول تأثیر زیادی دارد.
	ولتاژ الکتروود	متناسب با هر ماده معدنی ولتاژی به کار می‌رود که مستقل از سرعت روتور، قطر روتور و اندازه ذرات است.
	سرعت روتور	در سرعت بهینه بهترین عیار و بازیابی حاصل می‌شود.
	فشار هوا	کاهش فشار تأثیر اندکی بر روی جدایش ذرات ریز دارد.
	روتور نارسانا	با پوشش سطح روتور با یک لایه اکسیده سطح روتور به نیمه‌رسانا تبدیل شده و امکان جدایش ذرات با رسانایی بالا از ذرات دیگر ایجاد می‌شود.

۶-۶- فلوتاسیون

از فلوتاسیون برای پرعیارسازی انواع مختلفی از کانسنگ‌ها نظیر کانسنگ‌های سولفیدی (مس، سرب، روی و غیره)، اکسیدی (سرب، روی و غیره)، سیلیکاته (فلدسپات‌ها، پگماتیت‌ها و غیره)، فلزی (آهن) و غیرفلزی (زغال‌سنگ و کانی‌های صنعتی) استفاده می‌شود. اهداف و پارامترهای موثر در آزمایش‌های فلوتاسیون در مقیاس‌های آزمایشگاهی و پیشاهنگ در جدول (۶-۱۱) آمده است.

جدول ۶-۱۱ - آزمایش‌های فلوتاسیون در مقیاس‌های مختلف

مقیاس	اهداف	مرحله	پارامترهای موثر
آزمایشگاهی و پایه	<ul style="list-style-type: none"> - تعیین بازیابی فلز یا کانی مطلوب در مرحله امکان‌سنجی - بررسی تغییرات احتمالی در روند بازیابی کانی در نقاط مختلف کانسنگ - بررسی پارامترهای موثر بر فلوتاسیون - ارزیابی قابلیت کاربرد روش‌ها - تهیه شمای عملیات آزمایشگاهی فرآوری کانسنگ با قابلیت دستیابی به بازیابی اقتصادی از ماده معدنی 	نمونه و آماده‌سازی آن	<ul style="list-style-type: none"> - نوع کانسنگ - نوع و میزان دگرسانی - کانی‌شناسی (شناسایی کانی با ارزش و باطله) - تعیین مقدار نمونه مورد نیاز برای آزمایش - اکسایش احتمالی سطح نمونه‌ها در محل نگهداری (به ویژه در مورد سولفیدها) - تعیین عناصر سازنده در نمونه با انجام تجزیه شیمیایی کلی - بررسی‌های درجه آزادی و درگیری کانی‌ها در بخش‌های مختلف ابعاد و تعیین زمان بهینه خردایش با هدف دستیابی به دانه‌بندی مطلوب از نظر درجه آزادی کانی (کانی‌های) با ارزش
		عملیاتی	<ul style="list-style-type: none"> - بهینه سازی فلوتاسیون رافر با انجام آزمون‌های سیستماتیک برای تعیین غلظت بهینه هر یک از مواد شیمیایی، زمان فلوتاسیون و آماده سازی، ترتیب افزودن مواد شیمیایی مختلف و بررسی اثر آن بر بازیابی کانی با ارزش یا باطله - تعیین تعداد مراحل مختلف شستشو یا رمق‌گیری بر حسب نیاز - بررسی ضرورت خردایش مجدد کنسانتره - بررسی ضرورت استفاده از مواد شیمیایی - بررسی اثر مواد شیمیایی کمکی نظیر متفرق‌کننده‌ها و بازدارنده‌ها بر بازیابی باطله یا کانی با ارزش - بررسی‌های شیمی سطح و پتانسیل پالپ (در صورت نیاز) - تعیین مشخصات شمای عملیات فلوتاسیون با انجام آزمون‌های مدار بسته با هدف تعیین میزان بار در گردش، آب در گردش، ترسیم منحنی‌های تغییرات عیار- بازیابی و موازنه مدار فلوتاسیون - تعیین بهترین شرایط و مسیر فرآوری کانسنگ برای دستیابی به حداکثر بازیابی کانی (کانی‌های) مطلوب
واحد پیشاهنگ	<ul style="list-style-type: none"> - تایید شمای عملیات تکمیلی در مقیاس پایه و بررسی نتایج متالورژیکی - دستیابی به اطلاعات مناسب برای اهداف طراحی کارخانه - دستیابی به اطلاعات لازم برای افزایش مقیاس و فرآیندهایی که در مقیاس پایه انجام نشده‌اند. - ارزیابی تغییرات متالورژیکی، اقتصادی یا عملیاتی و در نتیجه تغییرات در شمای عملیات موجود - بررسی تاثیر عوامل شیمیایی در مدارها - بررسی و ارزیابی فرآیندها با روش‌های جدید - تهیه نمونه‌ها از محصولات جدید فرآوری برای ارزیابی - استفاده از نتایج واحد پیشاهنگ برای ارزیابی کارایی کارخانه‌های فرآوری موجود - آموزش کارکرد عملیاتی کارخانه 	نمونه	<ul style="list-style-type: none"> - مقدار نمونه: بر حسب یک دوره عملیات یک ماهه بررسی می‌شود. - دانه‌بندی نمونه
		عملیاتی	<ul style="list-style-type: none"> - ایجاد تناسب در نرخ خوراک‌دهی بر اساس نوع و عیار کانسنگ و انتخاب ابعاد آسیا بر اساس آن (تناژ بیشتر خوراک‌دهی برای کانسنگ‌های کم‌عیار و چند فلزی و تاثیر کمتر برای کانسنگ‌های پرعیار) - انجام آزمون‌های خردایش و فلوتاسیون به طور مستقل - آزمایش‌های انتخابی برای بررسی امکان بهبود شمای عملیات - آزمایش‌های انتخابی برای تعیین مقدار بهینه مصرف مواد شیمیایی مختلف - آزمایش‌های انتخابی با استفاده از آب بازیافتی - انجام عملیات به طور پیوسته بر اساس شمای عملیات با و بدون برگشتی - تست‌های آب‌گیری و فیلتراسیون - بررسی و تعیین مشخصات محصول فرآوری و اثر آن بر مراحل پایین‌دست مدار فرآوری

6-7- طراحی مدار انحلال و آزمایش‌های پایه و واحد پیشاهنگ

مدارهای انحلال سیانیدی عمدتاً شامل جذب و جدایش توسط کربن فعال، انحلال توده‌ای و انحلال توده‌ای مواد آگلومره شده، CIL³، CIP⁴ و اکسایش تحت فشار و بیواکسیداسیون است.

6-7-1- نمونه لازم برای فاز آزمایش‌های متالورژیکی

نمونه‌هایی که برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و متالورژیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل مغزه‌های حفاری، مواد حاصل از سیال حفاری و نمونه‌های گرفته شده از کانسار هستند که به طور معمول در حین عملیات اکتشافی انجام شده در دسترس هستند. خرده‌های حفاری⁵ برای آزمایش‌های متالورژیکی اولیه و مقدماتی مناسب هستند ولی برای بهینه‌سازی فرآیند خردایش مناسب نیستند. مغزه‌های حفاری به ویژه مغزه‌هایی با قطر بزرگ برای ارزیابی انحلال توده‌ای مناسب هستند. نمونه‌های کلی برای تمام فازهای آزمایش‌های متالورژیکی مناسب هستند.

6-7-2- آزمایش‌های متالورژیکی برای ارزیابی انحلال توده‌ای

اولین مرحله از آزمایش‌های متالورژیکی عیارسنجی کانه است که در آزمایشگاه انجام می‌گیرد. در بیشتر موارد همه و یا درصدی از مغزه‌های حفاری شده برای تعیین عیار کانه و همچنین قابلیت انحلال در فرآیند سیانوراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای انجام آزمایش‌های سیانوراسیون حدود ۱۰ تا ۳۰ گرم نمونه تا ابعاد ۱۵۰ مش مورد خردایش قرار می‌گیرد سپس پالپی با درصد جامد ۳۰ درصد تشکیل شده و آزمایش در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت و در دمای حدود ۹۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱ تا ۲ ساعت با استفاده از محلول سیانور انجام می‌گیرد (غلظت محلول سیانید سدیم معادل ۵ تا ۱۰ گرم بر لیتر است). بعد از این مرحله، پالپ فیلتر و ماده فیلتر شده (محلول باردار) تجزیه می‌شود و میزان فلزات با ارزش موجود در محلول تعیین می‌شود. با تجزیه پسماندهای جامد و عیارسنجی آن‌ها میزان فلزات موجود در پسماندهای جامد به دست می‌آید. با انجام عیارسنجی از پالپ و تعیین مقدار فلزات با ارزش از محلول باردار می‌توان میزان بازیابی آن‌ها را محاسبه و به صورت درصد بیان کرد. داده‌های آزمایش‌های سیانیدی قابلیت و توانایی سیانوراسیون ذرات خرد شده و ریزدانه را نشان می‌دهند. در حین استخراج، نمونه‌های جمع‌آوری شده از چال‌های انفجاری⁶ مورد عیارسنجی قرار گرفته و همچنین میزان انحلال و قابلیت حل شدن فلزات با ارزش در این نمونه‌ها توسط فرآیند سیانوراسیون تعیین شده و نتایج با فرآیند قبلی مقایسه می‌شود. داده‌های به دست آمده تفاوت‌های متالورژیکی کانه را مشخص می‌سازد.

3. Carbon in Leach
4. Carbon in Pulp
5. Cutting sample
6. Blast hole

الف- آزمایش‌های مقدماتی متالورژیکی

آزمایش‌های ظروف غلطان برای تعیین قابلیت انحلال توده‌ای ماده معدنی و ارزیابی آن به طور مقدماتی بر روی نمونه‌های حاصل از مغزه‌های حفاری انجام می‌گیرد. ابعاد خوراک در این مرحله حدود ۶ میلی‌متر ($\frac{1}{4}$ اینچ) است. این روش دارای مزایای زیر است:

- تعمیم نتایج داده‌های قبلی مربوط به پروژه و تطبیق آن‌ها با نتایج جدید؛
- تعیین شباهت‌ها و تفاوت‌های موجود ماده معدنی در زون‌های مختلف؛
- با استفاده از این نتایج در این نوع آزمایش‌ها تعداد نمونه‌ها و ترکیبات مورد آزمایش در فازهای بعدی آزمایش‌ها (تفصیلی) تعیین می‌شود.

آزمایش‌های ظروف غلطان حداقل با ۱ کیلوگرم نمونه از نمونه‌های جدا شده یا ترکیبی با ابعاد حدود ۶ میلی‌متر با آب مخلوط و پالپی با درصد جامد ۴۰ تهیه می‌شود. قبل و در حین عملیات pH طبیعی پالپ اندازه‌گیری می‌شود. بعد از اضافه کردن سیانید سدیم به مقدار ۱ گرم بر لیتر با افزودن آهک و یا سود تا pH پالپ بین ۱۰/۵ تا ۱۱/۰ تنظیم می‌شود.

با چرخش ظروف غلطان حاوی پالپ به مدت ۹۶ ساعت انحلال انجام می‌شود و بعد عملیات به تعلیق در می‌آید و با فواصل زمانی ۲، ۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت، محلول باردار برداشت شده و میزان سیانید سدیم در محلول باردار تعیین می‌شود. حجم نمونه‌های برداشته شده باید برای تعیین میزان مصرف حجمی عامل فروشویی و موازنه جرم مدار آزمایش باید کاملاً مشخص باشد. بعد از برداشت نمونه غلظت سیانید را به وضعیت اولیه برمی‌گردانند و در صورت لزوم آهک اضافه می‌کنند تا pH به حد مجاز ۱۱/۰-۱۰/۵ برسد و عملیات دوباره تکرار می‌شود.

بعد از ۹۶ ساعت پالپ فیلتر و مایع از جامد جدا می‌شود، سرانجام حجم محلول باردار برای تجزیه مقادیر Ag, Au, NaCl, pH اندازه‌گیری و نمونه‌برداری می‌شود.

پسماندهای جامد باید شستشو، خشک، توزین و عیارسنجی شوند.

با محاسبه عیار نمونه اولیه میزان بازیابی فلزات با ارزش قابل محاسبه خواهد بود. بازیابی فلزات با ارزش، میزان عامل فروشویی مصرفی و به طور کلی مقادیر واکنش‌گرها لازمه داده‌هایی هستند که از آزمایش‌های مقدماتی ظروف غلطان به دست می‌آیند. به طور کلی از آزمایش‌های مقدماتی ظروف غلطان موارد زیر به دست می‌آیند:

- قابلیت سیانوراسیون توده‌ای ماده معدنی؛
- وجود یا نبود ذرات طلا و کانه‌های سولفیدی حامل طلا؛
- تشخیص ضرورت انجام آگلومراسیون پیش از انحلال با استفاده از میزان کانی رسی؛
- تعیین درجه آزادی در دامنه ابعادی مختلف با انجام تجزیه سرنندی برای پسماندها.

آزمایش‌های ظروف غلطان در دامنه ابعادی متنوع تا ابعادی معادل ۵۰ میلی‌متر انجام می‌گیرد. اگر مغزه‌های حفاری در دسترس باشند ساینر بهینه خریداریش برای انجام فرآیند سیانوراسیون تعیین می‌شود.

ب- آزمایش‌های تفصیلی متالورژیکی

هدف اصلی و عمده عملیات متالورژیکی تفصیلی، بهینه‌سازی ابعاد ذرات در انحلال است. معمولاً آزمون‌های ستونی برای سایزهای مختلف انجام می‌گیرد.

ارزیابی و دانه‌بندی ذرات ماده معدنی با تجزیه سردی خوراک و باطله انجام می‌شود. ارزیابی از ابعاد ذرات قابل محاسبه است. از جمله اهداف عملیات انحلال در مطالعات تفصیلی، به موارد زیر اشاره می‌شود:

- تعیین نیاز به عملیات اولیه نظیر آگلومراسیون بر روی ماده معدنی؛

- تعیین ظرفیت مدار خردایش؛

- مشخص کردن هر گونه محصول جانبی قابل استحصال از ماده معدنی؛

- مشخص کردن اثرات زیست‌محیطی عملیات؛

- تعیین ارزیابی در فراکسیون‌های ابعادی مختلف ماده معدنی؛

- تعیین سیستم بهینه مدار انحلال برای ارزیابی فلزات با ارزش (مدار کربن- ترسیب و نظایر آن)؛

- بهینه‌سازی شرایط آگلومراسیون در عملیات پیش آماده‌سازی؛

- تعیین شرایط آب‌گیری پسماندهای فروشویی شده؛

- مطالعات فنی و اقتصادی آگلومراسیون پالپ؛

- تعیین سینتیک و نوع کربن برای فرآیند (CIC) در مدارهای جذبی؛

- به دست آوردن معیارهای طراحی برای مطالعات پیش امکان‌سنجی.

آزمایش‌های فروشویی ستونی به صورت معمولی در ستون‌هایی از جنس P.V.C در قطرها و ارتفاع‌های مختلف انجام می‌شود. قطر ستون برای کاهش اثر دیواره ستون باید حداقل ۶ برابر قطر بزرگترین ذرات باشد و برای کم کردن نسبت وزن محلول به وزن خوراک در هر روز فروشویی مقادیر ماده معدنی که به درون ستون‌ها شارژ می‌شود به صورت خشک است و با مقادیر مناسبی از آهک مخلوط می‌شود (میزان آهک از آزمایش‌های ظروف غلطان تعیین می‌شود) و در صورت نیاز آگلومراسیون انجام می‌شود (در صورت نیاز، قبل از باردهی) کانه‌ها شارژ شده و باردهی به ستون‌ها انجام می‌گیرد. این خوراک‌دهی باید به نحوی انجام شود که نه ذرات داخل ستون فشرده شوند و نه کاملاً با فاصله و با حفره‌های زیاد همراه باشند بلکه ذرات باید کمی فاصله‌دار باشند تا امکان حرکت عامل فروشویی به راحتی از میان ذرات امکان‌پذیر باشد و پدیده اثر دیواره‌ای رخ ندهد. مقداری مواد بی اثر در فرآیند فروشویی روی سطح مواد در ستون می‌ریزند تا عامل فروشویی به طور یکسان و یکنواخت بر سطح مواد و ذرات پخش شود.

در سیانوراسیون توصیه می‌شود که یک مدار کربن فعال چند مرحله‌ای به صورت موازی با فروشویی ستونی مورد استفاده قرار گیرد و محلول فروشویی عقیم دوباره به ابتدای فرآیند فروشویی برگشت داده شده و این کار در حین عملیات تکرار شود.

کربن باردار شده بعد از انجام عملیات و پس از آب‌گیری عیارسنجی شده و این کار برای ایجاد تعادل متالورژیکی آزمایش‌های یاد شده انجام می‌شود. عملیات فروشویی، مقدار خشک کانه شارژ شده و توزین چگالی ظاهری آن‌ها به دست می‌آید و مقادیر اشباع و

رطوبت باقی مانده نیز تعیین می‌شوند که برای موازنه و محاسبه آب مصرفی به کار می‌رود.

فروشویی با مصرف عامل فروشویی محلول سیانید سدیم (که غلظت بهینه آن به وسیله آزمایش‌های ظروف غلطان تعیین شده) انجام می‌شود و بیشترین آهنگ شارژ کانه (باردهی) در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۲ لیتر بر دقیقه بر مترمربع قرار دارد که در مقطع عرضی ستون سنجیده می‌شود.

حجم محلول باردار جمع شده در لوله‌های پوشش‌دار با حجم بالا، روزانه و به دقت اندازه‌گیری می‌شود. محلول باردار^۷ روزانه به داخل مدارهای کربن فعال (که ۳ تا ۵ مرحله است) پمپاژ می‌شود.

آب موجود در سیستم و واکنش‌گرهای اضافه شده و محلول عقیم فروشویی بارگیری شده را دوباره به چرخه برگشت می‌دهند. کربن باردار شده در ستون‌های جذبی، خشک، توزین و عیارسنجی می‌شود و در صورتی که نسبت نقره به طلا در محلول باردار بیشتر از ۱۰ باشد باید کربن فعال را تعویض کرد. به منظور دستیابی به دقت بالای محلول باردار ممکن است چندین چرخه مورد نیاز باشد. چرخه‌ها ۲ تا ۴ هفته به طول می‌انجامد و این چرخه‌ها ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که فلزات هدف در سیستم محلول باردار مشاهده نشود، در این حالت بیشترین بازیابی فلزات با ارزش حاصل می‌شود. بعد از فروشویی ستونی، برای تعیین مشخصه نقطه صفر و خنثی و بازیابی مقادیر حل شده پسماندهای جامد آب‌گیری می‌شود. حتی المقدور باید از محلول عقیم به جای آب خالص استفاده کرد. پس از آب‌گیری، پسماندهای ستون‌های مختلف تخلیه و مخلوط شده و رطوبت آن‌ها تعیین می‌شود.

آزمون‌های ستون برای ارزیابی دقیق فنی و اقتصادی هر پروژه لازم است. آهنگ بازیابی بر اساس بازیابی تناژ عامل فروشویی به تناژ کانه فروشویی شده انجام می‌شود که دقت آن در مقایسه با بازیابی بر اساس زمان بیشتری است. آزمون‌های فروشویی ستونی با دقت بالا میزان مصرف عامل فروشویی را تعیین نمی‌کند. میزان مصرف عامل فروشویی در فرآیند آزمایش‌های ستون بیشتر از میزان تجاری و واقعی آن است و به طور کلی میزان مصرف عامل فروشویی در فرآیند آزمایش‌های ستون، ۴ برابر بیشتر از تجربه‌های تولید تجاری است. در این زمینه آزمایش‌های ظروف غلطان، نتایج و داده‌های واقعی را نشان می‌دهد.

قبل از روش فروشویی توده‌ای باید ضرورت انجام آگلومراسیون (پیش‌عمل‌آوری) که عموماً در فاز ارزیابی‌های اولیه و مقدماتی انجام می‌گیرد، تعیین شود (شرح داده شده است). در صورت وجود کانی‌های رسی در کانسنگ اصلی و یا در خردایش بیش از حد، پیش‌عمل‌آوری و آگلومراسیون ضروری است. اگر ابعاد بیش از ۱۰٪ وزنی کانه کمتر از ۱۵۰ مش باشد (یا شامل رس باشد) در این صورت پیش‌عمل‌آوری و آگلومراسیون توصیه می‌شود.

پ - آگلومراسیون در فروشویی توده‌ای

شرایط آگلومراسیون با استفاده از آزمون‌های با مقیاس آزمایشگاهی یا ناپیوسته بهینه‌سازی می‌شود. در این آزمایش‌ها که تحت عنوان آزمایش‌های توانایی آگلومراسیون نامیده می‌شوند، آزمون‌های فرورفتگی در آب صورت می‌گیرد. این آزمایش‌ها مقیاسی برای تعیین توانایی فرآیند آگلومراسیون است. در این بخش آزمون‌های جیگ برای اندازه‌گیری پایداری آگلومراسیون انجام می‌شود. این آزمون‌ها به صورت فراگیر در تمام جهان در این فاز عملیات انجام می‌گیرد که منجر به تعیین شرایط بهینه آگلومراسیون برای

7. PLS (Pregnant Leach Solution)

عملیات فروشویی توده‌ای می‌شود.

سه پارامتر اصلی مهم در آگلومراسیون عبارتند از:

- مقدار ماده افزودنی چسباننده به فرآیند (سیمان - آهک و یا ترکیب آن‌ها)؛

- رطوبت آگلومراسیون؛

- زمان عمل‌آوری.

در عمل‌آوری لازم است که افزودنی‌های چسبنده از نظر مقدار بهینه شوند. بر اساس تجربه کمترین زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت است. در مقیاس صنعتی، زمان عمل‌آوری برابر زمانی است که برای ایجاد یک سطح مناسب از مواد آگلومره شده برای فروشویی توده‌ای مناسب باشد به گونه‌ای که عامل فروشویی به صورت کاملاً جهت‌دار به سطح مواد برخورد کند و عمل نفوذ به راحتی انجام شود. این زمان حدود ۷۲ ساعت است. در زمان عمل‌آوری نیازی به بهینه‌سازی میزان رطوبت نیست.

آگلومره تولید شده میزان رشد قطعات آگلومره و لایه‌لایه‌شدگی و به هم‌آمیختگی ذرات را نشان می‌دهد. آگلومره تولیدی شامل یک ذره درشت به عنوان هسته با لایه‌های چسبیده به آن است و همچنین ذرات ریز به هم آمیخته شده نیز در کنار ذرات متوسط در اثر رطوبت به هم آمیخته شده‌اند. مقدار رطوبت افزودنی سیستم در آگلومراسیون در مورد پایداری آگلومره و فاز آماده‌سازی بسیار مهم است. رطوبت زیاد در سیستم باعث عدم پایداری و کاهش قدرت استحکام مواد به هم چسبیده می‌شود.

آزمایش‌های تعیین قدرت و پایداری آگلومراسیون توسط سیستم‌های دستگاهی انجام می‌گیرد. فاز آماده‌سازی خوراک برای آگلومراسیون بسیار مهم است چون باید مشخص شود که ابعاد چند درصد بزرگتر از ۱۰ مش و چه مقدار آن کمتر از ۱۰ مش است و در نهایت با توزین آن‌ها مقدار رطوبت موجود تعیین شود.

مواد زیر ۱۰ مش با هم مخلوط شده و به عنوان خوراک برای آگلومراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مرحله ۱ تا ۲ کیلوگرم ماده به سیستم شارژ می‌شود. مواد شارژ شده باید از نقطه نظر دانه‌بندی یکسان باشند تا آزمایش‌های آگلومراسیون در مورد آن‌ها انجام گیرد. این مواد با نسبت‌های مشخص با مواد چسبنده مخلوط می‌شوند و بعد از خیس شدن با آب در یک جام (گردان) هم‌زده می‌شوند.

مواد آگلومره شده بعد از این مرحله درون ظروف مدرج تا مدت ۷۲ ساعت قرار می‌گیرند و عملیات تثبیت انجام می‌شود. ذرات آگلومره‌ای که دارای قدرت کافی و استحکام بالا باشند در مدت ۲۴ ساعت که در تماس با آب هستند از هم جدا نمی‌شوند. ولی ذرات ضعیف در کمتر از ۱ ساعت کاملاً تخریب شده و از هم پاشیده می‌شوند.

ت- ارزیابی فروشویی توده‌ای در مقیاس پیشاهنگ

در مورد مواد استخراج شده از معدن انجام آزمایش‌های فروشویی در مقیاس پیشاهنگ ضروری است ولی برای کانسنگ‌های قابل فروشویی که نیاز به ۲ یا چند مرحله خردایش دارند لازم نیست. تهیه نمونه‌هایی با دقت بالا برای انجام آزمایش‌های در مقیاس پیشاهنگ عموماً پرهزینه است.

آزمایش‌های ارزیابی فروشویی توده‌ای در مقیاس پیشاهنگ برای مواد معدنی استخراج شده از معدن در ستون‌های با قطر ۱/۲ تا

۲ متر انجام می‌شود. حدود ۲۰ تن نمونه معرف برای آزمون فروشویی و تجزیه‌های سرنندی مورد نیاز است.

در مقیاس پیشاهنگ که از ستون‌های با قطر بزرگ استفاده می‌شود باید نسبت قطر ستون به قطر ذرات درشت، در حد معینی باشد. آزمایش‌های فروشویی توده‌ای در مقیاس پیشاهنگ یک مزیت عمده دارد و آن این که می‌توان ارتفاع تقریبی توده را شبیه‌سازی کرد.

خردایش باید تا حد ۱۰۰ میلی‌متر انجام گیرد و یک سری ستون‌های فروشویی با قطر ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶ متر مورد نیاز است و ذرات ریزتر را می‌توان با ستون‌هایی با قطر کمتر فروشویی کرد. مزایای شبیه‌سازی ارتفاع واقعی فروشویی توده‌ای در مقیاس پیشاهنگ به شرح زیر است:

- هزینه کم و کارایی روش؛
- امکان تعیین زمان تاخیر برای بازیابی فلزات با ارزش به هنگام افزایش ارتفاع؛
- پیش‌بینی چرخه کلی عملیات فروشویی برای بازیابی فلزات هدف بر اساس نسبت وزن محلول و عامل فروشویی به کار رفته به وزن کانسنگ مورد نظر؛
- امکان ارزیابی کانسنگ‌هایی که قابلیت فروشویی دارند؛
- امکان انجام شبیه‌سازی مناسب از ارتفاع توده؛
- امکان تهیه نمونه‌های معرف برای تشخیص و شبیه‌سازی فرآیندی که برای پسماندهای معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛
- امکان فراهم کردن تمام داده‌های نهایی برای طراحی نهایی کارخانه و مطالعات امکان‌سنجی مربوطه برای عملیات صنعتی؛
- تعیین آهنگ زهکشی و دستیابی به داده‌هایی مورد نیاز برای مدلسازی حجم زهکشی.

ث- مرحله مقدماتی آزمایش‌های سیانوراسیون

برای ارزیابی اولیه مغزه‌های حفاری و نمونه‌های کلی و ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مورد عملیات سیانوراسیون آزمایش‌ها بر روی کل کانسنگ انجام می‌گیرد.

اندازه ذرات ورودی به سیستم ۷۵ میکرون (۲۰۰ مش) است و عمدتاً در آزمایش‌های ظروف غلطان و یا ظروف دارای همزن‌های مکانیکی شارژ می‌شوند. ضرورت پیش‌عمل‌آوری برای پرعیارسازی و یا اکسایش اولیه کانسنگ قبل از عملیات فروشویی، معمولاً در این فاز تعیین می‌شود. آزمایش‌های متالورژیکی اولیه به طور طبیعی بعد از این مرحله به اجرا در می‌آید. اهداف مرحله آزمایش‌های مقدماتی به شرح زیر است:

- تعیین قابلیت عملیات سیانوراسیون که عبارتند از: بازیابی فلزات با ارزش، مواد شیمیایی مورد نیاز؛
- مشخص کردن ابعاد بهینه خردایش با استفاده از تجزیه سرنندی؛
- بررسی ضرورت انجام عملیات پیش‌عمل‌آوری (فلوتاسیون، روش‌های ثقلی) و یا اکسایش اولیه؛

- انتخاب نوع فرآیند بازیابی نظیر فرآیند ترسیب با فلز روی^۸ و فرآیند کربن فعال^۹؛
 - تعیین پتانسیل جدایش فازهای جامد و مایع از همدیگر و مشخصات حرکتی پالپ و ملاحظات مربوطه. ملاحظات سیانوراسیون آزمایش ظروف غلطان به شرح زیر است:
 - خوراک ورودی به سیستم باید خردایش شود که عمدتاً با آسیای گلوله‌ای انجام می‌شود؛
 - عملیات فروشویی باید تا زمانی که تمام کانسنگ خرد شده تا حد مجاز فروشویی شود، ادامه یابد (حداکثر ۹۶ ساعت)؛
 - در خلال ساعات ۲۴ تا ۳۶ باید از محلول باردار نمونه‌گیری شود؛
 - غلظت.
- پسماندهای فروشویی باید عیارسنجی شده و میزان فلزات باارزش محتوی آنها تعیین شود. با تعیین میزان توزیع دانه‌بندی آنها ابعاد بهینه خردایش کانسنگ تعیین می‌شود. دلایل استفاده از مخزن‌های دارای همزن‌های مکانیکی نسبت به ظروف غلطان به شرح زیر است:

- مخازن فروشویی همزن‌دار عملیات شبیه سازی فروشویی را بهتر انجام می‌دهند؛
- امکان ترکیب اکسیژن با مواد و اکسایش کامل وجود دارد؛
- در جدایش فازهای مایع جامد خصوصیات حرکتی پالپ را تسهیل می‌کند؛
- در این سیستم بدون توقف عملیات در هر زمان امکان نمونه‌برداری وجود دارد.

ج- مرحله بهینه‌سازی

- در این مرحله از مغزه‌های حفاری به عنوان نمونه استفاده می‌شود. اهداف این مرحله به شرح زیر است:
- تایید روش مورد استفاده و پیش‌بینی‌های بعدی بر اساس داده‌های اولیه؛
 - بهینه‌سازی خردایش، تعیین زمان ماند و میزان مواد شیمیایی لازم؛
 - تایید بازیابی و کارایی سیستم؛
 - دستیابی به داده‌های لازم برای جداسازی فاز جامد مایع و خصوصیات حرکتی پالپ؛
 - تعیین همه معیارهای لازم برای طراحی مدار خردایش؛
 - تکمیل ارزیابی‌های ژئوتکنیکی برای طراحی سدهای باطله^{۱۰}؛
 - مشخص کردن اثرات زیست‌محیطی جریان‌های خروجی فرآیند؛
 - فراهم کردن داده‌های لازم برای تولید محصول هدف و انجام مطالعات امکان‌سنجی؛
 - مشخص کردن واحدهای عملیاتی مورد نیاز برای ارزیابی سیستم در مقیاس پیشاهنگ.

8. Zinc precipitation

9. Activated carbon process

10. Tailing Impoundment

- سیانوراسیون برای بازیابی فلزات با ارزش از کانسنگ‌های مربوطه با روش‌های کربن در پالپ،^{۱۱} کربن در لیچ^{۱۲}، تخلیه با جریان مخالف^{۱۳} انجام می‌گیرد.
- بعد از انجام مرحله خردایش که توسط آسیای گلوله‌ای انجام می‌گیرد، آب به سیستم اضافه شده و پالپی با میزان جامد ۵۵ تا ۶۵ درصد تهیه می‌شود.
- در چرخه‌های مختلف انحلال آزمایش‌های بهینه‌سازی غلظت محلول انجام می‌گیرد. بعد از بهینه‌سازی خردایش، pH، زمان ماند، میزان عامل انحلال افزودنی در مقیاس بزرگ تعیین می‌شود.
- خلاصه روش‌ها، اهداف و ملاحظات در آزمایش‌های مختلف فروشویی در مقیاس‌های آزمایشگاهی و پیشاهنگ در جدول (۶-۱۲) آمده است.

جدول ۶-۱۲ - خلاصه مشخصات روش‌های فروشویی در مقیاس‌های آزمایشگاهی و پیشاهنگ

مقیاس آزمایش	اهداف	مشخصات نمونه	روش‌ها/ ابزار/ مکانیزم	ملاحظات
آزمایشگاهی	<p>- تعیین قابلیت انجام فرآیند فروشویی با تعیین مقدار و نرخ بازیابی و مصرف مواد شیمیایی</p> <p>- تعیین حد بهینه خردایش و دانه‌بندی به کمک تجزیه سرنندی باطله فرآیند فروشویی</p> <p>- تعیین لزوم پرعیارسازی یا اکسیداسیون اولیه برای بهبود بازیابی کلی فلز با ارزش و نرخ بازیابی</p> <p>- انتخاب بهترین روش بازیابی فلز از محلول (مانند ترسیب، استخراج با حلال و نظایر آن)</p> <p>- شناسایی مشکلات احتمالی فرآیند جدایش جامد/ مایع و مسایل رئولوژی مرتبط با آن</p> <p>- تعیین پارامترهای موثر و مقدار آن‌ها نظیر pH، غلظت عامل فروشویی، دانه‌بندی و نظایر آن</p> <p>- مطالعات سینتیکی بر روی فرآیند فروشویی مورد نظر</p> <p>مهم‌ترین داده‌های حاصل از مطالعات اولیه (آزمایشگاهی):</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ بازیابی (نهایی) فلز با ارزش ➤ نرخ بازیابی (تغییرات بازیابی - زمان) ➤ مقدار مصرف مواد شیمیایی <p>امکان‌پذیری کاربرد هر گونه روش تکمیلی نظیر آگلومراسیون، بررسی درجه آزادی محصول و غیره</p>	<p>نمونه‌های نماینده و خرد شده معمولاً تا ابعاد ۲۰۰ مش (۷۵ میکرومتر)، در آزمایش‌های بطری غلطان، حداکثر ابعاد دانه‌های مواد معدنی می‌تواند ۳/۷۵ سانتی‌متر باشد، مقدار نمونه در بررسی‌های فروشویی برحسب نوع بررسی و هدف آن متغیر است، ولی به طور معمول در هر نوبت یک کیلوگرم آزمایش می‌شود.</p>	<p>بطری غلطان، همزنی (همزن آزمایشگاهی)، ستونی (ستون‌های آزمایشگاهی و مکانیزم percolation)</p>	<p>- در تهیه نمونه‌های کانسنگ کم‌عیار نظیر طلا آماده سازی باید با دقت زیاد و به روش تقسیمات و مخلوط کردن متقاطع صورت گیرد.</p> <p>- روش بطری غلطان معمولاً برای بررسی قابلیت فروشویی و تعیین مقادیر پارامترها استفاده شده و روش‌های هم‌زنی و ستونی آزمایشگاهی به ترتیب برای تعیین قابلیت فروشویی نمونه به روش‌های هم‌زنی و توده‌ای در مقیاس‌های بزرگ‌تر به کار می‌روند.</p> <p>- در روش فروشویی ستونی، قطر ستون‌ها باید شش برابر قطر درشت‌ترین ذره ماده معدنی باشد. ارتفاع ستون نیز متغیر است ولی معمولاً ۳ تا ۶ متر در نظر گرفته می‌شود.</p>

11. CIP

12. CIL

13. CCD (Counter current decantation)

ادامه جدول ۶-۱۲ - خلاصه مشخصات روش‌های فروشویی در مقیاس‌های آزمایشگاهی و پیشاهنگ

ملاحظات	روش‌ها/ ابزار/ مکانیزم	مشخصات نمونه	اهداف	مقیاس آزمایش
<p>- بهترین روش در آماده‌سازی نمونه تقسیم نمونه به ۵ زیرگروه یا بیشتر، سپس تعیین وزن مشخصی برای هر بخش و سپس ترکیب آن‌ها برای ایجاد نمونه‌های مخلوط است. نمونه نماینده نیز به طریق مشابهی تهیه می‌شود.</p> <p>- نمونه‌های مغزه حفاری، در صورتی که مرحله سنگ‌شکنی نیز به مدار فروشویی اضافه شود، بهترین نوع برای ارزیابی قابلیت بازیابی ماده معدنی به روش فروشویی توده‌ای است.</p> <p>- مطالعات فروشویی توده‌ای تقریباً همواره برای نمونه‌های مستقیماً استخراجی ضروری است، ولی در مورد نمونه‌هایی که دو یا چند مرحله خردایش را طی می‌کنند همیشه ضرورت ندارد.</p> <p>- روش فروشویی هم‌زنی با بازیابی بالا برخلاف هزینه‌های بیشتر عملیاتی و سرمایه‌ای آن نسبت به روش توده‌ای برای کانسنگ‌های پرعیارتر مناسب است.</p>	<p>مخازن یا تانک‌های فروشویی، مجهز به ابزارهای نمونه‌گیری و کنترلی</p>	<p>ابعاد نمونه می‌تواند از ابعاد سنگ استخراجی یا آتشیاری شده (در محل دپو) تا ابعاد ذرات خردایش شده و نهایتاً ابعاد کنسانتره (حاصل از مراحل پرعیارسازی) متغیر باشد. مقدار نمونه متناسب با روش و معمولاً برای هر ستون در مقیاس پیشاهنگ حدود ۲۰ تن نمونه نماینده است. در مورد آزمایش فروشویی توده‌ای حداقل ۵۰/۰۰۰ تن نمونه مورد نیاز است.</p>	<p>به طور کلی برای تعیین دقیق‌تر پارامترهای عملیاتی در آزمایش و تولید محصول کافی برای تعیین پارامترهای طراحی نظیر مصرف مواد شیمیایی، زمان‌های ماند و غیره، البته لزوم انجام این آزمایش‌ها (معمولاً از لحاظ اقتصادی) قطعی نیست و ممکن است آزمایش‌های مقیاس پایه به تنهایی نیاز لازم را برآورده کنند، به خصوص در مورد روش‌های شناخته شده‌ای مانند CIL کانسنگ اکسیده طلا</p>	پیشاهنگ

فصل ۷

آب‌گیری، خشک کردن و انباشت باطله

۷-۱- جدایش جامد-مایع

روش‌های پرعیارسازی در محیط سیال و معمولاً در حضور آب (روش‌های ثقلی تر، روش‌های مغناطیسی تر، فلوتاسیون، روش‌های کانه‌آرایی شیمیایی مانند انحلال و غیره) انجام می‌شوند. در این حالت محصول پرعیار شده نهایی به صورت پالپی خواهد بود که پیش از انجام هر عمل دیگری اعم از انتقال به کارخانه ذوب، عملیات متالورژیکی و یا ارایه به بازار، باید ذرات جامد کانی مورد نظر از پالپ جدا شود. همچنین در اکثر موارد، بخش عمده‌ای از آب به همراه باطله از کارخانه فرآوری خارج می‌شود که به منظور انباشت باطله، جلوگیری از آلوده شدن محیط توسط آب و بالاخره بازیافت آب برای استفاده مجدد در مدار عملیات و کاهش میزان آب مصرفی، جداکردن آب از باطله نیز ضرورت دارد. بنابراین پس از خاتمه عملیات پرعیارسازی و تولید محصولات، عمده‌ترین فعالیت جدایش فازهای جامد از مایع در باطله و کنسانتره است. عملیات جداسازی جامد از مایع در مراحل مختلفی به شرح زیر انجام می‌شود:

- ته‌نشین‌سازی؛

- فیلتر کردن؛

- خشک کردن؛

در شرایطی که اختلاف چگالی جامد و مایع زیاد باشد، روش ته‌نشین‌سازی دارای بهترین بازدهی است. در آب‌گیری باطله‌های کارخانه فرآوری اغلب از این روش استفاده می‌شود. بخش عمده‌ای از آب، ابتدا به روش ته‌نشین‌سازی از ذرات جامد جدا می‌شود و تولید پالپ غلیظی شامل ۵۵ تا ۶۰ درصد وزنی جامد می‌کند. در این مرحله می‌توان حدود ۸۰ درصد از آب موجود در پالپ را جدا کرد. سپس با فیلتر کردن پالپ غلیظ شده، کیک با رطوبت ۱۰ تا ۲۰ درصد حاصل می‌شود. در صورت لزوم می‌توان در مرحله خشک کردن، رطوبت جامد را به ۵ درصد یا حتی کمتر رساند.

تجهیزات آب‌گیری جدایش جامد از مایع در پالپ برای رساندن رطوبت به میزان مورد نیاز به کار می‌رود. بسته به درصد جامد و فرآیند بعدی از تجهیزات مختلفی نظیر انواع تیکنر، انواع فیلترهای خلا، خشک‌کن‌ها و نظایر آن‌ها استفاده می‌شود. در جدول (۷-۱) مشخصات دستگاه‌های آب‌گیری و پارامترهای موثر در آن‌ها درج شده است.

جدول ۷-۱- دستگاه‌های آب‌گیری و پارامترهای موثر در آن‌ها.

هدف	روش (دستگاه)	پارامترهای موثر- ملاحظات
آب‌گیری، تغلیظ پالپ و بازیافت آب	تیکنر، فیلتر	درصد جامد پالپ خوراک درصد مواد معلق (ذرات رسی) در پالپ ترکیب شیمیایی پالپ و نقش فلوکولان روش رسوب دادن ذرات جامد درجه مورد نیاز از شفافیت محلول نهایی درصد رطوبت باقیمانده ابعاد تیکنر، نوع و اندازه پره‌ها زمان ماند پالپ در تیکنر تعداد مراحل فیلتراسیون یا دفعات آب‌گیری در تیکنر مصرف آب شستشو در فیلترها مقدار مصرف محلول شستشو در مورد فیلتراسیون محصول فروشویی نوع فیلتر (مکانیزم فیلتراسیون) درصد سطح داخلی فیلتر آهنگ تشکیل کیک یا آهنگ آب‌گیری در فیلتراسیون
جدایش جامد-مایع در روش‌های فرآوری نظیر هیدرومتالورژی	تیکنرها فیلترها خشک‌کن‌ها سایر روش‌ها (سمانتاسیون، رسوب ثقلی سیکلون و غیره)	

۷-۲- طراحی تیکنرها

عوامل موثر در طراحی تیکنرها به شرح زیراند:

- رقت پالپ یا درصد وزنی جامد به مایع در خوراک؛
- اندازه و شکل ذرات جامد؛
- اختلاف جرم مخصوص فازهای جامد و مایع؛
- وجود الکترولیت‌ها و فلوکولانت‌ها؛
- گرانیروی پالپ؛
- درجه حرارت پالپ.

برای دستیابی به نتیجه مناسب در ته‌نشین‌سازی ثقلی باید تمام پارامترهای فوق و تاثیر هر یک بر عملکرد تیکنر به دقت مطالعه شوند. معمولاً این مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی و با روش‌هایی که در بخش قبل توضیح داده شد، انجام می‌شوند. در برخی موارد نیز مطالعات پیشاهنگ برای تولید داده‌های مهندسی قابل استناد در طراحی نهایی است.

۷-۳- مطالعات فیلتراسیون

تیکنرها در بهترین شرایط تنها درصد مشخصی از مایع موجود در پالپ را جدا می‌کنند و برای تغلیظ بیشتر پالپ و تکمیل عملیات آب‌گیری از فیلتراسیون استفاده می‌شوند. فیلتر یا صافی از یک سطح متخلخل تشکیل شده که منافذ آن برای عبور مایع مناسب است. این منافذ از عبور دانه‌های جامد جلوگیری کرده و با گذراندن آب پالپ، آن را آب‌گیری می‌کنند. اختلاف فشار بین دو طرف فیلتر باید ناشی از وزن پالپ روی سطح فیلتر باشد یا با اعمال فشار اضافی بر روی سطح و یا کاهش فشار در سمت دیگر ایجاد شود، این اختلاف فشار ممکن است در اثر نیروی گریز از مرکز نیز به وجود آید.

فیلترها علاوه بر استفاده به منظور کاهش رطوبت، در موارد دیگری نظیر هیدرومتالورژی مثل جدایش طلا از محلول سیانور نیز به کار می‌روند.

به طور کلی عوامل متعددی در عملیات فیلتراسیون تاثیرگذار هستند که در مطالعات آزمایشگاهی چگونگی و میزان تاثیر این پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرد و به عنوان مبنایی برای طراحی مدار فیلتراسیون عملیات صنعتی به کار می‌رود. از جمله این عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سرعت دوران فیلتر؛
- سرعت به هم زدن پالپ؛
- اختلاف فشار دو سمت فیلتر؛
- گرانیروی پالپ؛
- مقاومت مخصوص کیک فیلتر.

۷-۴- خشک کردن

در کارخانه‌های فرآوری، با روش‌های ته‌نشینی و فیلتراسیون رطوبت مواد را تا حد مشخصی کاهش می‌دهند. برای تکمیل عملیات آب‌گیری و یا حذف کامل رطوبت آن از روش‌های حرارتی برای تبخیر آب باقیمانده استفاده می‌شود. در این مرحله، هدف از کاهش رطوبت از بین بردن آب آزاد موجود در مواد، یعنی آبی است که به طور فیزیکی به دانه‌های ذرات جامد چسبیده و سطح آن‌ها را تر کرده است. در روش خشک کردن مستقیم، حرارت از طریق تماس مستقیم هوا یا گاز گرم با ماده مورد نظر به آن اعمال می‌شود. اما در روش غیرمستقیم، حرارت در محیط جداگانه‌ای ایجاد شده و به طور غیرمستقیم مثلاً از طریق دیواره‌های خشک‌کن به آن منتقل می‌شود. سرعت خشک شدن ذرات مختلف بستگی به ضرایب انتقال حرارت و جرم، سطح تبخیر و اختلاف دما و رطوبت مواد و هوا یا گاز خشک موجود در محیط دارد.

عوامل مهم طراحی و انتخاب خشک‌کن‌ها به شرح زیر است:

- مشخصات ماده مورد نظر (قبل و بعد از خشک شدن)، شامل توزیع ابعادی، گرانروی، میزان نرمه، قابلیت اشتعال و خوردگی؛
- مشخصات خشک کردن از قبیل نوع رطوبت، حداکثر دمای مجاز، محدودیت زمانی که ماده مجاز است در درجه حرارت خاصی قرار گیرد؛
- کیفیت محصول مورد نظر نظیر چگالی، آلودگی، درصد رطوبت، یکنواختی رطوبت، دما؛
- موقعیت خشک‌کن از لحاظ فضای در دسترس، دسترسی به سوخت، برق، آب، شرایط جوی، قوانین موجود در مورد تخلیه پساب و نظایر آن.

۷-۵- انباشت باطله

آخرین مرحله در فرآیند فرآوری مواد معدنی، انباشت باطله و در صورت امکان بازیافت آب موجود در آن است. این مساله به ویژه در کانسارهای بزرگ و کم‌عیار که حجم باطله زیادی دارند، بسیار حایز اهمیت است. خواص باطله واحدهای فرآوری مختلف به شدت وابسته به نوع فرآیند کانه‌آرایی است. به عنوان مثال باطله کارخانه‌های فلوتاسیون بسیار دانه‌ریز و حاوی آلودگی‌های شیمیایی است که هم امکان آب‌گیری را مشکل می‌کند و هم از لحاظ تاثیرات زیست‌محیطی ممکن است مشکلاتی را به وجود آورد. بالعکس باطله حاصل از روش‌های ثقلی به خصوص واسطه سنگین درشت‌دانه است که هم تخلیه و هم بازیافت آب را تسهیل می‌سازد. باطله کارخانه‌های فرآوری معمولاً پس از یک مرحله آب‌گیری درون تیکنرها، به صورت پالپ به محل انباشت باطله حمل می‌شوند. رایج‌ترین روش انباشت باطله، احداث سد و انبار کردن مواد در پشت آن است. حجم حوضچه تشکیل شده به وسیله سد باید کافی و ساختمان آن پایدار باشد. علاوه بر آن امکان نصب تاسیسات مربوط به کنترل عملیات در آن وجود داشته باشد.

۷-۶- ملاحظات زیست‌محیطی در طراحی سدهای باطله

- ایمنی خطوط لوله و پمپ مورد نظر برای انتقال باطله‌ها؛
 - ایمنی و پایداری خاک‌ریز سد باطله تابعی از ارتفاع خاک‌ریز، شیب خاک‌ریز، مقاومت و تراکم مواد مصرفی برای ساخت خاک‌ریز، نفوذپذیری خاک‌ریز، مقاومت و تراکم فونداسیون خاک‌ریز و در نظر گرفتن ارتفاع خارج از آب کافی برای اطمینان از سرریز نشدن است؛
 - برای کنترل آلودگی آب باید پالایش آب در سد باطله مورد توجه قرار گیرد. میزان آب ورودی از فرآیند به سد باطله، آب بازگشتی به کارخانه، بارش‌های جوی، آب نشتی از مخزن سد و نفوذکننده به زمین و آب تبخیر شده باید مورد توجه قرار گیرد؛
- برای مطالعات بیشتر در زمینه ضوابط انباشت باطله به نشریه «ضوابط انباشت باطله و مواد زاید در واحدهای فرآوری»، مراجعه شود.

خواننده گرامی

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر پانصد عنوان نشریه تخصصی-فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در پایگاه اطلاع‌رسانی nezamfanni.ir قابل دستیابی می‌باشد.

امور نظام فنی

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision

Criteria for Ore Dressing Tests in Lab, Bench and Pilot Plant Scales

No. 544

Office of Deputy for Strategic Supervision

Ministry of Industries and Mines

Bureau of Technical System

Deputy office of Mining Affairs and Mineral
Industries

Office for Mining Exploitation and Supervision

nezamfanni.ir

<http://www.mim.gov.ir>

2011

این نشریه

اطلاعات لازم برای انجام آزمایش
های کانه‌آرایی در مقیاس های
آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ را به
منظور طراحی مدار عملیات در مقیاس
صنعتی و انتخاب تجهیزات کارخانه‌های
کانه‌آرایی را ارائه می‌دهد.