Archive of SID

نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)
دوره پنجم، شماره نهم، سال 8389، صفحه 69 تا 78
Vol. 5, No. 9, 2010, pp.69-78

پرعیارسازی اولیه خوراک مدار فلوتاسیون سرب و روی لکان به وسیله سیکلون واسطه سنگین

عبدالمطلب حاجتی[8*]، علی دهقانی[2]، جواد صامعی برزکی[3]
1- مربی گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی اراک، دانشگاه علم و صنعت ایران، E-mail:am_hajati@iust.ac.ir
2- استادیار دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی
3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه یزد

(دریافت 22 تیر 8388 ، پذیرش 9 اسفند 8388)

چکیده

سیکلون‌های واسطه سنگین کاربرد وسیعی در جدایش ثقلی کانی‌ها دارند. در این تحقیق امکان کاربرد این وسیله برای جدایش بخشی از باطله سیلیسی از بار اولیه مدار فلوتاسیون کارخانه سرب و روی لکان بررسی شد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی غرق و شناورسازی، بر روی نمونه‌هایی به ابعاد 82-8 میلی‌متر نشان داد که امکان جدایش بخشی از باطله با روش ثقلی وجود دارد. به این منظور یک دستگاه سیکلون واسطه سنگین در مقیاس نیمه- صنعتی طراحی، نصب و راه اندازی گردید. بهینه‌سازی جدایش سیکلون با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با تنظیم فشار بار ورودی در حد 3 psi، شیب سیکلون 82 درجه و نسبت واسطه به بار 2/8، توزیع وزنی سرب و روی، به ترتیب به میزان 83/9٪ و 88/4٪ حاصل شد. در این صورت عیار سرب و روی در کنسانتره به ترتیب، 2/86٪ و 8/66٪ به دست آمد. در این شرایط حدود 44٪ از بار ورودی به مدار فلوتاسیون به عنوان باطله کم عیار حذف شد. با حذف این بخش از بار اولیه، امکان افزایش ظرفیت کارخانه فرآوری سرب و روی لکان تا حدود دو برابر ظرفیت فعلی از طریق جدایش نیمی از گانگ سخت سیلیسی توسط سیکلون واسطه سنگین وجود دارد.

کلمات کلیدی

سیکلون واسطه سنگین، فلوتاسیون، بهینه‌سازی، ظرفیت، سرب و روی، لکان

[*] نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

8- مقدمه

کانسنگ‌های استخراجی پس از حمل به کارخانه فرآوری به منظور جدایش بهینه و اقتصادی کانی‌های مفید، تحت عملیات خردایش و جدایش قرار می‌گیرند. معمولاً در روش‌های ثقلی بر مبنای اختلاف چگالی کانی‌ها، جدایش کانی‌های سنگین از سبک انجام می‌شود. جدایش به روش واسطه سنگین، یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین آنها به‌شمار می‌آید [1] و [2]. لذا با توجه به هزینه‌های بالای آسیاکنی، چنانچه بتوان به کمک این روش امکان حذف باطله قبل از مراحل جدایش بعدی (مثلاً فلوتاسیون) فراهم گردد، بخش قابل توجهی از هزینه‌های فرآوری صرفه‌جویی خواهد شد. بعلاوه، میزان تناژ بار ورودی کاهش و عیار ورودی به مراحل بعدی افزایش می‌یابد. در این شرایط علاوه بر افزایش کارآیی فرآیند کلی مدار، امکان افزایش ظرفیت مدار هم فراهم می‌گردد. همچنین هزینه‌های سرمایه‌گذاری لازم در کارخانه فرآوری نیز کاهش خواهد یافت [3] و [4].

سیکلون واسطه سنگین بطور گسترده‌ای برای فرآوری زغال و آرایش اولیه کانه‌های فلزی نظیر سرب و روی استفاده می‌شود. خوراک در این نوع جداکننده تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز زیاد و گرانروی کم، شامل بار ورودی و واسطه می‌باشد. محصول نهایی سیکلون شامل یک بار سنگین از ته‌ریز و یک بار سبک از سرریز حاصل می‌گردد. سیکلون‌های واسطه سنگین اکثراً به طور مایل و یا معکوس نصب می‌شوند. معمولاً نوع واسطه مصرفی در این نوع سیکلون‌ها بصورت سوسپانسیونی از منیتیت یا فروسیلیس (و یا مخلوطی از آن دو) در آب تهیه می‌شود. منیتیت برای جدایش زغال و فروسیلیس برای جدایش کانی‌های فلزی مانند سرب و روی استفاده می‌شود. در مصارف صنعتی هر دوی آنها به روش جدایش مغناطیسی بازیافت می‌شوند[5].

تحقیقات زیادی تاثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیکلون واسطه سنگین را بررسی کرده‌اند. در شکل 1 تعدادی از مهم‌ترین پارامترهای سیکلون واسطه سنگین و نقش آنها در ارتباط با کارآیی سیکلون نشان داده شده است. دی گلدر[1]، دالستروم[2] و همکارانش در سالهای 1952 تا 1961 نشان دادند که افت فشار سیکلون رابطه تقریباً خطی با توان عملیاتی آن دارد[6]. لینچ[3] و همکارانش در سال 1975 با ارائه مدل تجربی‌ای نشان دادند که توان عملیاتی سیکلون بصورت خطی با افزایش فشار بار ورودی، ظرفیت سیکلون نیز افزایش می‌یابد[6] و [7]. پلیت[4] و همکارانش نیز در فواصل سال‌های 1976 و 1987 ثابت کردند که با افزایش فشار بار ورودی ظرفیت سیکلون نیز افزایش می‌یابد[8]. این موضوع توسط محققین مرکز تحقیقات JKMRC، نپییرمون[5] و همکارانش در سالهای 1997 تا 1999 با توسعه مدل تجربی از عملکرد سیکلون واسطه سنگین نیز به اثبات رسیده است[9]. موخرجی[6] در سال 2112، جان جی رینر[7] و همکارانش در سال 2112، بصورت مقالاتی جداگانه طی بررسی‌های خود نشان دادند که پارامترهایی نظیر قطر دهانه سرریز، ته ریز و فشار ورودی سیکلون بر دبی خوراک ورودی مؤثرند. با افزایش قطر سرریز و ته‌ریز دبی خوراک و به تبع آن ظرفیت سیکلون افزایش می‌یابد. ولی تغییر در قطر سرریز و ته ریز قادر است کارآیی سیکلون را با تغییرات زیادی مواجه نماید. همچنین به وسیله افزایش تعداد سیکلون‌ها نیز می‌توان ظرفیت مدار پرعیارسازی شامل سیکلون واسطه سنگین را با لحاظ سرمایه‌گذاری بیشتر افزایش داد [5] و [6].

درکارخانه فرآوری سرب و روی لکان، از روش فلوتاسیون به منظور آرایش این کانه استفاده می‌شود. کانه استخراجی پس از مراحل سنگ‌شکنی و آسیا در مسیر بسته، به مدار فلوتاسیون ارسال می‌شود. ظرفیت اسمی این کارخانه 321 تن در روز و عیار متوسط خوراک سرب و روی، به ترتیب 1/66٪ و 7/4٪ است[11] و [11]. انتقال مستقیم بار اولیه حاوی میزان زیادی باطله سیلیسی به مدار فلوتاسیون، باعث کاهش ظرفیت کلی کارخانه شده است. تصمیم مدیریت کارخانه جهت افزایش ظرفیت بار ورودی به مدار فلوتاسیون، پایین بودن عیار سرب و روی در خوراک و سخت و ساینده بودن باطله سیلیسی همراه آن، باعث شد تا طرح سیکلون واسطه سنگین برای خارج کردن بخشی از باطله، قبل از فرآیند آسیا و فلوتاسیون بررسی شود. در ادامه نتایج مطالعات انجام شده در این رابطه، در مقیاس‌های آزمایشگاهی و نیمه صنعتی آورده شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-8-آماده‌سازی مواد و آزمایش مایعات سنگین

یکی از روش‌های دقیق آزمایشگاهی بررسی امکان آرایش اولیه کانه‌ها با روش ثقلی، آزمایش‌های غرق و شناور سازی با استفاده از مایعات سنگین است. در آرایش اولیه کانه‌های سرب و روی معمولا از روش‌های جدایش ثقلی مانند سیکلون واسطه سنگین و دایناویرپول استفاده می‌شود. در این تحقیق استفاده از سیکلون واسطه سنگین قبل از مدار آسیاکنی بررسی شد. در ابتدا بررسی مطالعات جدایش به کمک مایعات سنگین بر روی

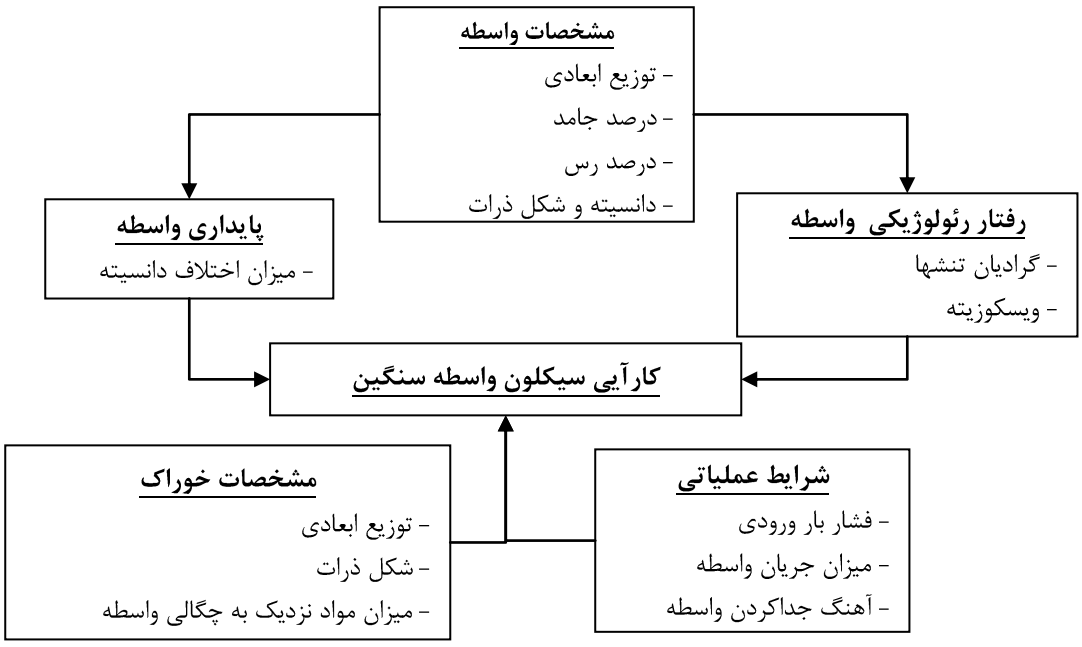
www.SID.ir

Archive of SID

نمونه‌های تهیه شده از بار ورودی به بخش آسیا صورت پذیرفت. نمونه‌های مورد نظر در فاصله زمانی 11 دقیقه و از تمام سطح مقطع نوار، به مدت سه روز و در سه شیفت متوالی تهیه شدند. نمونه‌های حاصل از همگن‌سازی، به عنوان معرف برای انجام آزمایش‌های بعد تهیه گردید[13].

مطابق مشخصات جدول 1، نمونه‌های در محدوده دانه بندی (11-1) میلی‌متر و (11-2/8) میلی‌متر ، بعد از آماده سازی وارد مایع سنگین با بیشترین چگالی شده (به ترتیب g/cm^3 2/97، g/cm^3 2/89) و در ادامه، بخش شناور شده هر ظرف وارد ظرف بعدی شد. در پایان با توزین و آنالیز عیار نمونه‌های غرق شده در هر ظرف و شناور شده در آخرین ظرف، داده‌های مورد نظر بدست آمد. جهت افزایش اطمینان از نتایج به دست آمده، این آزمایش‌ها در دو مرحله و بر روی نمونه‌های معرف خوراک ارسال شده از دو ارتفاع استخراجی 1974 و 1939 متر معدن عمارت انجام شد. نتایج حاصل از مرحله اول این آزمایش‌ها در شکل2 ارائه شده است. با توجه به شکل 2 تمرکز کانی‌های درگیر در محدوده چگالی g/cm^3 2/89-2/75 بسیار بالا می‌باشد. در چگالی‌های بالاتر از g/cm3 2/89 جدایش کانی باارزش و در چگالی‌های پایین‌تر از g/cm^3 2/75 جدایش گانگ واضح‌تر بدست آمده است. همچنین فاصله زیاد بین دو منحنی توزیع سرب و روی در باطله نشانگر تلفات بیشتر سرب می‌باشد. پایین بودن عیار سرب در خوراک می‌تواند یکی از دلایل احتمالی این موضوع باشد. چنانچه چگالی g/cm^3 2/8 به عنوان چگالی جدایش در نظر گرفته شود، تقریباً نیمی از بار ورودی به‌عنوان باطله در بخش شناور جدا خواهد شد. در این شرایط عیار سرب و روی در بخش شناور به ترتیب 1/5و 1/75 درصد و توزیع سرب و روی در آن به ترتیب 14/45و4/94 درصد خواهد شد. به عبارت دیگر توزیع سرب و روی در بخش ته‌ریز (کنسانتره) به ترتیب 85/55 و95/16 درصد و عیار سرب و روی در آن به3/14 و 14/95درصد خواهد رسید، یعنی عیار کنسانتره تقریبا دو برابر عیار خوراک خواهد شد. همچنین در این مرحله از آزمایش‌ها، میزان مواد با ابعاد ریزتر از 1 میلی‌متر از کل نمونه موجود، به میزان، 25-21 درصد کل بار اولیه بدست آمد که عیار سرب و روی آن به ترتیب1/83 و 54/ 7درصد می‌باشد. این مقدار با عیار سرب و روی خوراک که 1/66و 7/4 درصد است تقریباً برابر است.

آزمایش‌های مرحله دوم در محدوده دانه‌بندی 2/8+ ، 11- میلی‌متر و وزن مخصوص مایع سنگین در محدوده g/cm^3 2/89- 2/7 انجام شد. علت حذف چگالی g/cm^3 2/97 در این مرحله جدایش واضح کانی‌های باارزش در چگالی g/cm^3 2/89 با توجه به نتایج مرحله قبل بود. تغییر دانه‌بندی در این مرحله جهت بررسی بار اولیه با ابعاد ریزتر از 2/8 میلی‌متر از نظر وزن و عیار درنظر گرفته شد. درصد وزنی بار زیر سرند 2/8 میلی‌متر 35-31 درصد کل بار و عیار سرب و روی آن به ترتیب 1/79 و 5/32 درصد به‌دست آمد.



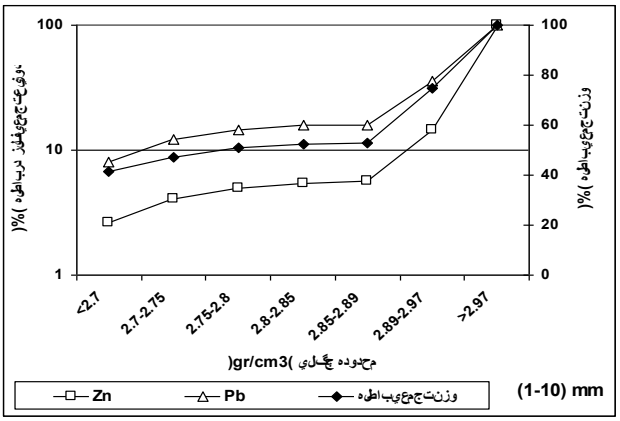
شکل8: شماتیکی از نحوه عملکرد پارامترهای مختلف مؤثر و متغیر بر سیکلون واسطه سنگین [82]

www.SID.ir

Archive of SID

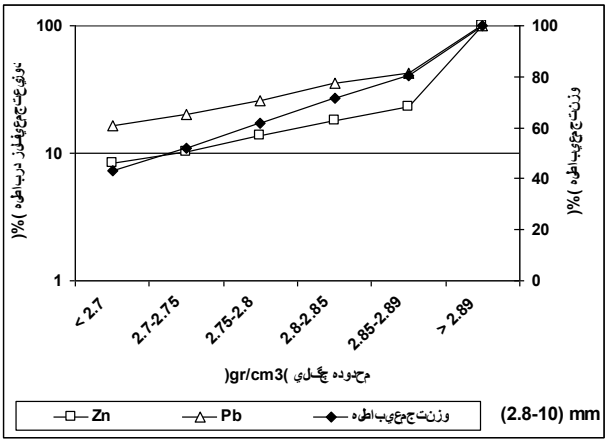
جدول 8: مشخصات نمونه و مایع سنگین در دو مرحله آزمایش

مشخصات	مرحله اول	مرحله دوم
دانه‌بندی نمونه (mm)	1-11	2/8-11
وزن نمونه (g)	812	918
عیار نمونه (%)	Pb=1/66 Zn=7/4	Pb=1/5 Zn=5/2
محدوده چگالی (g/cm^3)	2/7-2/97	2/7-2/89
مایع سنگین و حلال	1-1-2-2- تترابرمواتان، برموفورم و استون	برموفورم و استون



شکل2: وزن تجمعی باطله و توزیع فلز در چگالی‌های مختلف (مرحله اول)

در شکل3 نتایج آزمایش‌های این مرحله نشان داده شده است. عیار سرب و روی خوراک در این مرحله 1/5و 5/2 درصد می‌باشد. بنابراین عیار بار ورودی کمتر از مرحله قبل است. با انتخاب چگالی 2/75 به منظور حذف تقریبا 51 درصد از بار ورودی به‌عنوان باطله با عیار سرب 1/53درصد و روی 1/97درصد، مقدار 11/2 درصد از روی و 21/1 درصد از سرب به باطله منتقل می‌شود. بنابراین توزیع سرب و روی در کنسانتره به ترتیب79/91 و89/81 درصد خواهند بود، که با این شرایط عیار سرب و روی در کنسانتره به 2/6 و 9/75 درصد خواهد رسید (عیار کنسانتره تقریبا دو برابر عیار خوراک خواهد شد). لازم به یادآوری است که در هر دو مرحله آزمایش‌های مایع سنگین، میزان توزیع وزنی سرب و روی در محدوده دانه‌بندی‌های مذکور در جدول 1 محاسبه شده است. میزان کل فلز سرب و روی موجود در بخش کوچکتر از 1mm و 2/8mm در محاسبه نتایج شکل‌های 2 و3 دخیل نشده است. بعلاوه، با اندازه‌گیری میزان تخلخل کانسنگ مورد استفاده در هر دو مرحله آزمایش مایعات سنگین در محدوده 1/44-1/47 درصد (میانگین 1٪) بدست آمد که از دخالت آن در اندازه‌گیری و ارزیابی نتایج صرفنظر شده است.



شکل 3: وزن تجمعی باطله و توزیع فلز در چگالی‌های مختلف (مرحله دوم)

از مقایسه داده‌های حاصل از دو مرحله آزمایش مایعات سنگین، دو نتیجه مهم جهت بکارگیری آن در سیکلون واسطه سنگین استخراج شد. الف) انتخاب چگالی جدایش تا حد زیادی به مشخصات بار اولیه بستگی دارد. زیرا با کاهش عیار بار ورودی میزان تلفات سرب و روی در باطله زیاد می‌شود. در این صورت بهتر است با کاهش چگالی جدایش از تلفات سرب و روی در باطله جلوگیری شود. ب) با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های فوق بر روی نمونه‌های با ابعاد درشت‌تر از 2/8 و 1 میلی‌متر و مقایسه آن با نمونه‌های صنعتی، سرند 2mm برای حد پائینی دانه بندی انتخاب گردید.

2-2- سیکلون واسطه سنگین در مقیاس نیمه صنعتی

پس از انتخاب سیکلون واسطه سنگین، به عنوان روش ثقلی مناسب، مطالعات جهت طراحی و ساخت آن انجام شد. به منظور کنترل پارامترهای موثر در سیکلون واسطه سنگین و جلوگیری از اتلاف بار و واسطه، آزمایش‌های سیکلون واسطه سنگین در یک مدار بسته انجام گرفت. تجهیزات مورد استفاده در این مدار بسته، شامل یک واحد سیکلون واسطه سنگین و تجهیزات جانبی آن (پمپ، الکتروموتور، شاسی‌های سیکلون، لوله و اتصالات، مخزن و فشارسنج) بوده است[2]، [14] و [16].

www.SID.ir

Archive of SID

2-2-8- آماده سازی بار اولیه و واسطه

یکی از مسایل مهم در انجام این پروژه و هر پروژه نیمه صنعتی، نحوه نمونه‌گیری و آماده‌سازی بار اولیه مورد نظر می‌باشد. دانه-بندی بار قبل از آسیا ریزتر از 11 میلی‌متر می‌باشد. جهت نمونه‌گیری، نمونه‌های مورد نظر از روی نوار نقاله قبل از آسیا و از تمام سطح مقطع نوار به مدت یک هفته و در شیفت‌های مختلف تهیه شد. از همگن‌سازی این نمونه‌ها، 9 نمونه 81 کیلوگرمی جهت انجام آزمایش‌ها تهیه شد. عیار میانگین سرب و روی هر یک از این نمونه‌ها پس از آنالیز به عنوان عیار خوراک سیکلون واسطه سنگین به طور متوسط، به ترتیب 1/84 و 5/87 درصد به‌دست آمد.

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، حد تحتانی ابعاد بار اولیه مورد استفاده در سیکلون واسطه سنگین 2 میلی‌متر انتخاب شد. جداسازی ذرات ریزتر از 2 میلی‌متر با استفاده از سرندهای تر انجام شد. با توجه به ارتباط چگالی جدایش و عیار خوراک، بر اساس نتایج آزمایش‌های مایع سنگین، چگالی $2/75\ g/cm^3$ به عنوان چگالی جدایش انتخاب شد. با انتخاب فروسیلیس با چگالی $6/5\ g/cm^3$ و دانه بندی 95٪ ریزتر از 65 مش (معادل 218 میکرون استاندار سرندهای تیلور)، محاسبات جهت تعیین مقدار واسطه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های نیمه صنعتی انجام شد. با لحاظ نمودن حجم و جرم آب مورد نیاز مدار، به ترتیب 81lit و 81Kg، برای انجام هر تست نیمه صنعتی با چگالی $2/75\ g/cm^3$، تقریبا 241Kg فروسیلیس بکار گرفته شد.

2-2-2- طراحی آزمایش‌ها

از آنجا که عوامل زیادی بر کارآیی سیکلون واسطه سنگین در مقیاس نیمه صنعتی موثرند، جهت بررسی اثرات این عوامل از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی با نرم افزار Design Expert استفاده شد[16]. در این طراحی سه پارامتر شیب سیکلون، فشار بار ورودی و نسبت واسطه به بار در سه سطح مختلف با آرایه L_9 انتخاب و انجام شد. سطوح مختلف این سه پارامتر در جدول 2 آمده است.

جدول 2: سطوح پارامترهای متغیر در سیکلون واسطه سنگین

	پارامترها	سطح 1	سطح 2	سطح 3
A	فشار(psi)	2	3	4
B	شیب سیکلون (درجه)	11	15	25
C	نسبت واسطه به بار	5	4/2	2/8

3- شرح آزمایش

پس از نصب مدار سیکلون واسطه سنگین در مقیاس نیمه صنعتی، آزمایش‌های مورد نظر طراحی و انجام شد. بدین منظور جهت انجام اولین آزمایش، ابتدا شیب مورد نظر سیکلون و دور پمپ برای ایجاد فشار مورد نظر تنظیم و سپس مقدار 81 لیتر آب در مخزن مربوطه ریخته شد و پمپ روشن گردید. پس از آن، فروسیلیس محاسبه شده در مرحله قبل به صورت تدریجی وارد مخزن گردید تا واسطه با چگالی مورد نظرساخته شده در مدار به جریان درآید. همزمان، با چگالی‌سنج چگالی واسطه خروجی از تهریز سیکلون اندازه‌گیری شد. زمانی که چگالی واسطه به میزان 1/2 تا 1/3 کمتر از چگالی مورد نظر رسید، ریختن واسطه در مخزن متوقف گردید[17]. زمان لازم جهت رسیدن سیکلون و مدار به شرایط پایدار 5 دقیقه در نظر گرفته شد. پس از آن مقدار مورد نیاز از خوراک به صورت تدریجی وارد مخزن شده و این بار به مدت 11 دقیقه به مدار فرصت داده شد تا با شرایط موجود پایدار شود. پس از آن از تهریز و سرریز به طور همزمان نمونه گیری انجام شد. (نمونه‌گیری به کمک یک ظرف از تمام سطح مقطع خروجی و در یک لحظه انجام شد).

جدول 3: نتایج توزیع فلز و عیار سرب و روی در کنسانتره و باطله آرایه L_9 در سیکلون واسطه سنگین

شماره آزمایش	سطوح			توزیع فلز در کنسانتره (٪)		عیار در باطله (٪)	
	فشار (psi)	شیب (درجه)	نسبت واسطه به بار	سرب	روی	سرب	روی
1	3	2	1	45/78	44/98	1/14	3/61
2	3	1	3	69/21	61/99	1/77	2/95
3	1	1	1	73/16	77/21	1/79	1/66
4	2	2	3	61/13	89/23	1/81	1/31
5	1	3	3	79/33	76/68	1/95	2/99
6	1	2	2	46/66	81/55	1/12	1/41
7	2	1	2	66/63	83/16	1/77	1/34
8	2	3	1	61/78	72/15	1/91	1/96
9	3	3	2	49/71	71/47	1/21	2/11

در لحظه نمونه‌گیری فشار مربوطه از روی فشارسنج کنترل و ثبت شد. برای انجام بقیه آزمایش‌ها نیز ابتدا مخزن تخلیه و پس از شستشوی کامل مدار، مراحل پیش گفته تکرار گردید.

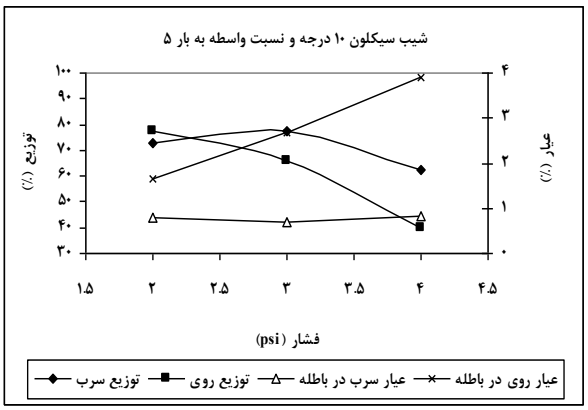
www.SID.ir

Archive of SID

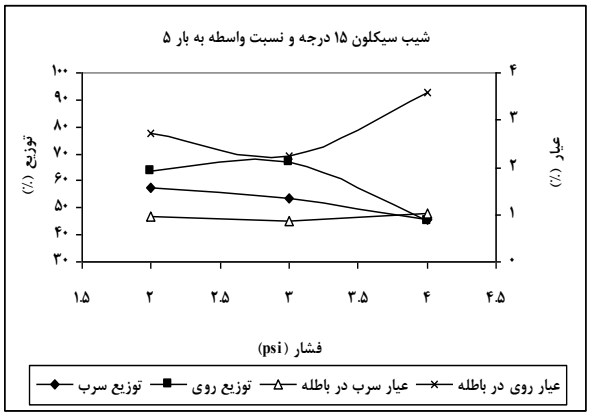
جهت تغییر فشار مدار از شیر کنترل استفاده گردید. توزیع سرب و روی در کنسانتره و عیار سرب و روی در باطله به عنوان پاسخ‌های مورد نظر در نرم افزار Design Expert، برای بدست آوردن بیشترین توزیع کنسانتره و کمترین عیار سرب و روی در باطله مورد ارزیابی قرار گرفته شد. در جدول 3 طراحی آزمایش‌ها و پاسخ‌های مورد نظر نشان داده شده است. در ادامه به کمک این نتایج و رسم نمودارهای آن در نرم افزار Excel رفتار این پارامترها بررسی گردید.

3-8- اثر فشار

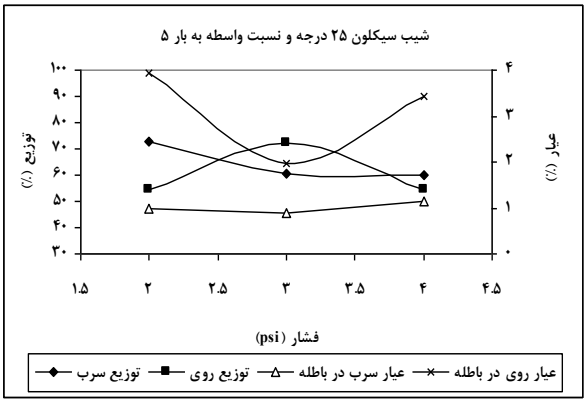
با توجه به نتایج جدول 3، و شکل‌های 4، 5 و 6 تاثیر فشار بر پاسخ‌های توزیع سرب و روی در کنسانتره و عیار سرب و روی در باطله، در سطوح مختلف دو پارامتر دیگر نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، در همه شرایط توزیع روی در کنسانتره و عیار روی در باطله، در فشار 3 psi به نقطه بهینه می‌رسند، به طوری که توزیع حداکثر و عیار حداقل خواهد شد. اما در مورد توزیع سرب و عیار آن در باطله شرایط متفاوت است. در تمام شرایط، تغییرات عیار سرب در باطله با تغییرات فشار بسیار ناچیز است. در مورد توزیع سرب نیز می‌توان گفت که در همه شرایط با افزایش فشار، توزیع سرب کاهش می‌یابد. بدین ترتیب نقطه بهینه برای فشار بین 2psi و 3 psi برآورد می‌شود.



شکل 4: تاثیر فشار بر پاسخ در شیب 82 درجه و نسبت واسطه به بار 5



شکل 5: تاثیر فشار بر پاسخ در شیب 85 درجه و نسبت واسطه به بار 5



شکل 6: تاثیر فشار بر پاسخ در شیب 25 درجه و نسبت واسطه به بار 5

با توجه به شکل‌های 4، 5 و 6 جهت ارزیابی توزیع سرب و روی مشخص شده است که میزان تغییرات با افزایش شیب سیکلون از 11 درجه به 15 و 25 درجه در نسبت واسطه به بار5، کاهش می‌یابد. بطوریکه این مقدار برای توزیع سرب تقریباً از 21٪ نوسان به 11٪ و 11٪ و برای توزیع روی از 41٪ نوسان به 25٪ و 21٪ به ترتیب کاهش یافته است. با توجه به رفتار سیکلون بر مبنای جدایش ثقلی و تاثیر بارز چگالی کانی‌های موجود باعث تغییر رفتار جدایش ذرات محتوی کانی‌ها شده است. در این شرایط احتمال عبور کانی‌های محتوی سرب و روی از سرریز به ته‌ریز تغییر خواهد کرد. در نهایت با افزایش شیب و فشار بطور همزمان، میزان نوسانات توزیع سرب و روی از حساسیت کمتری برخوردار خواهد شد. همچنین، میزان نوسانات عیار و توزیع کانی‌های محتوی سرب (اکثراً گالن) بیشتر از کانی‌های محتوی روی (اکثراً اسفالریت) می‌باشد. چگالی بالاتر گالن نسبت به چگالی اسفالریت در کنار دیگر کانیهای باطله، باعث جدایش راحت‌تر با نوسانات کمتری

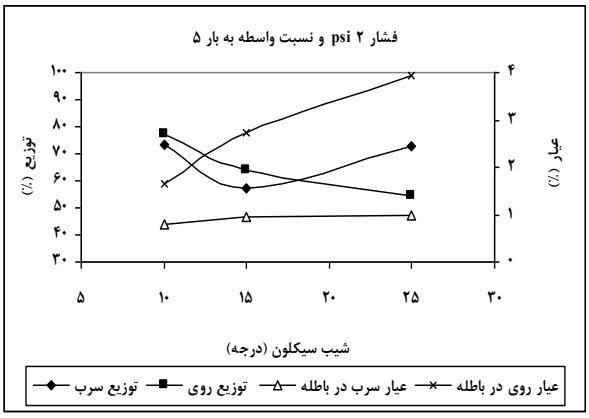
www.SID.ir

Archive of SID

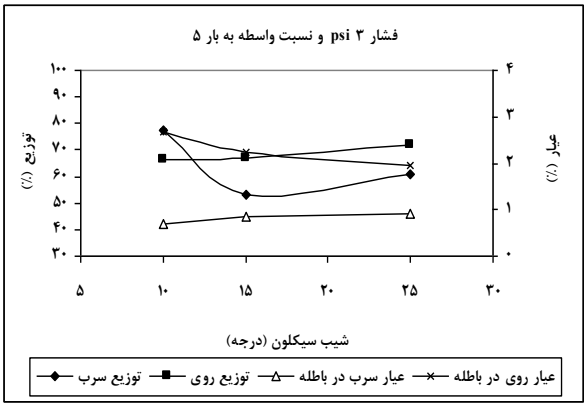
در میزان توزیع آنها بوده است. نزدیکی چگالی اسفالریت به کانی‌های باطله باعث حساسیت بیشتر رفتار آن نسبت به گالن تحت شرایط متغیر شیب، فشار و نسبت واسطه به بار به‌دست آمده است.

3-2- اثر شیب سیکلون

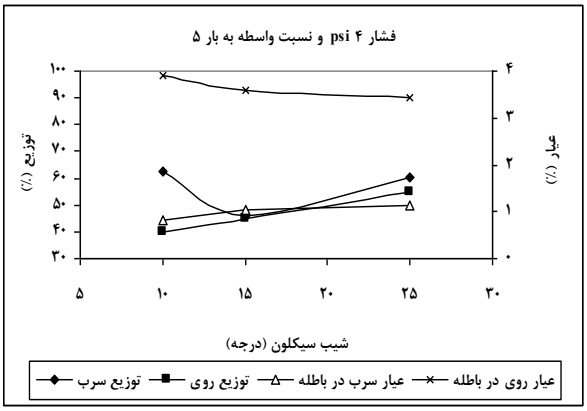
در شکل‌های 7، 8 و 9 تاثیر شیب سیکلون بر پاسخ‌های توزیع سرب و روی در کنسانتره و عیار سرب و روی در باطله، در سطوح مختلف از دو پارامتر دیگر نشان داده شده است. در شرایط مختلف فشار و نسبت بار به واسطه، توزیع سرب در شیب 15 درجه حداقل است. بنابراین در اکثر شرایط، این شیب نمی‌تواند شیب مناسبی برای سیکلون باشد. تغییرات عیار سرب در باطله نیز در مقابل تغییرات شیب ناچیز است. این دقیقا همان رفتاری است که این پاسخ در مقابل تغییرات فشار نیز از خود نشان داده بود.



شکل 7: تاثیر شیب بر پاسخ در فشار2psi و نسبت واسطه به بار 5



شکل 8: تاثیر شیب بر پاسخ در فشار3psi و نسبت واسطه به بار 5



شکل 9: تاثیر شیب بر پاسخ در فشار4psi و نسبت واسطه به بار 5

تغییرات توزیع و عیار روی در باطله کمی پیچیده‌تر به نظر می‌رسد. ولی چنانچه در بررسی این دو پاسخ، دو پارامتر شیب و فشار بطور همزمان در نظر گرفته شود، نتیجه‌گیری ساده تر خواهد شد. لذا با افزایش شیب سیکلون در شرایطی که فشار بار ورودی در سطح بالایی باشد (4 psi)، عیار روی در باطله کاهش و در نتیجه توزیع روی افزایش می‌یابد. اما چنانچه فشار در سطح پایین باشد (2 psi)، با افزایش شیب، عیار روی در باطله افزایش و توزیع روی کاهش می‌یابد. نهایتاً با افزایش شیب در شرایطی که فشار 3 psi باشد، تغییرات توزیع روی ناچیز خواهد بود. شاید این رفتار بتواند این‌گونه توجیه شود که در شیب و فشار کم، نیروی ثقل و گریز از مرکز بر بار در شرایط مناسبی قرار دارند. با افزایش شیب نیروی ثقل بیشتر شده و چنانچه فشار در همان سطح باقی بماند، مقداری از بار سرریز، به ته‌ریز رفته و باعث کاهش توزیع روی می‌شود. اما چنانچه با افزایش شیب، فشار نیز زیاد شود بین این دو نیرو، تعادل لازم برقرار و توزیع روی افزایش می‌یابد. در فشار3psi نیز شرایط این دو نیرو متعادل است. بنابراین شیب سیکلون ارتباط تنگاتنگی با فشار مورد نظر خواهد داشت و از آنجا که در بخش قبل فشار مناسب بار ورودی بین 2 psi تا 3psi ارزیابی شد، لذا شیب11 درجه بهترین گزینه برای شیب سیکلون خواهد بود.

3-3- اثر نسبت واسطه به بار

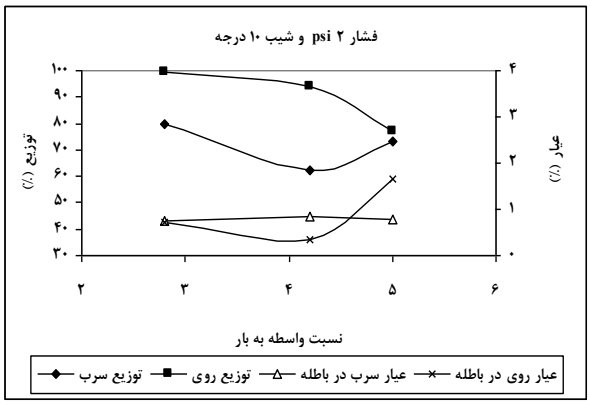
در شکل‌های 11، 11 و 12 تاثیر نسبت واسطه به بار، بر پاسخ‌های توزیع سرب و روی در کنسانتره، و عیار سرب و روی در باطله، درسطوح مختلف از دو پارامتر دیگر نشان داده شده است. در شرایط مختلفی از فشار و شیب، پاسخ‌ها با تغییر نسبت واسطه به بار رفتار یکسانی دارند. این موضوع نشانگر این

www.SID.ir

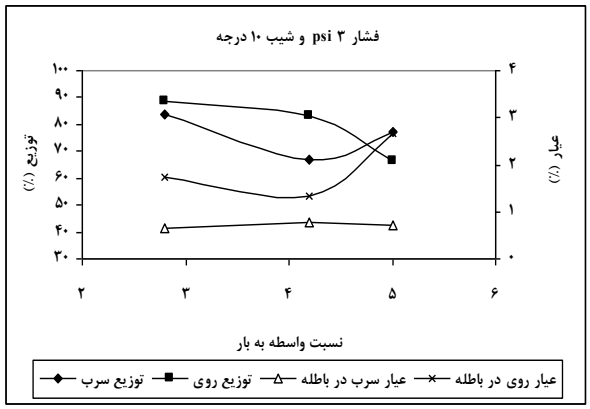
Archive of SID

مسئله است که بر خلاف دو پارامتر قبلی این پارامتر هیچ اثر متقابلی با آن‌ها ندارد.

مشابه پارامترهای فشار و شیب، با تغییر پارامتر نسبت واسطه به بار، عیار سرب در باطله تغییرات ناچیزی دارد. نکته قابل توجه در مورد تاثیر این پارامتر، افزایش توزیع سرب و روی با افزایش بار ورودی به سیکلون و در نتیجه با کاهش نسبت واسطه به بار است. به نظر می‌رسد بررسی نسبت‌های کمتر این پارامتر (با افزایش بیشتر بار ورودی) نتایج بهتری به همراه داشته باشد[6] و [7].



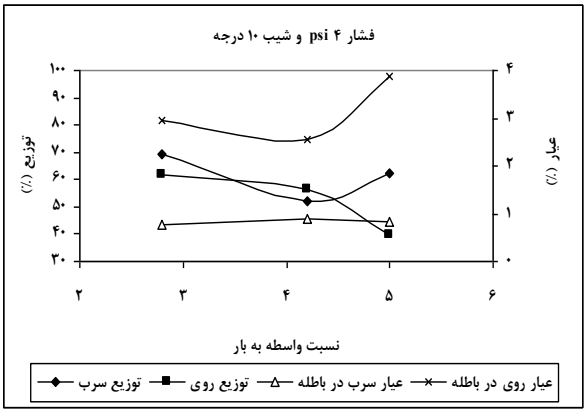
شکل82: تاثیر نسبت واسطه به بار بر پاسخ در فشار psi 2 و شیب 82درجه



شکل 88: تاثیر نسبت واسطه به بار بر پاسخ در فشارpsi 3 و شیب 82 درجه

4- ارزیابی نقطه بهینه

به طور کلی با ارزیابی نتایج آزمایش‌های انجام شده، سطوح بهینه پارامترهای موثر شامل: فشار بین2psi تا 3 psi، شیب 11درجه و نسبت واسطه به بار در سطح 3 یعنی مقدار 2/8



شکل 82: تاثیر نسبت واسطه به بار بر پاسخ در فشار psi 4 و شیب 82درجه

بدست آمد. انتخاب این نقطه از دید نرم افزارDesign Expert نقطه‌ای است که در آن فشار 3psi، شیب 11 درجه و نسبت

واسطه به بار در سطح 3 یعنی مقدار 2/8 باشد، که با شرایط بهینه استنباط شده از نمودارها بسیار نزدیک است. لذا توزیع سرب و روی به ترتیب 83/9 و 88/4 درصد و عیار سرب و روی در باطله به ترتیب 1/65 و 1/73 درصد خواهد شد. از آنجا که عیار خوراک در آزمایش‌های سیکلون به عیار نمونه مورد آزمایش در مرحله دوم آزمایش‌های مایعات سنگین نزدیک است، با مقایسه نتایج مشخص شده که به جز عیار روی در باطله، بقیه نتایج تا حد زیادی با آن هماهنگ هستند. محاسبات متالورژیکی انجام شده نشان داده است که توزیع، عیار خوراک و باطله برای سرب به ترتیب برابر با 83/9، 1/84و 1/65 درصد و برای روی به ترتیب برابر با 88/4، 5/87 و 1/73 درصد بدست می‌آید و مقادیر عیارکنسانتره سرب و روی 2/86و 8/66 درصد محاسبه می‌شود. نسبت وزن کنسانتره به خوراک برای سرب و روی به ترتیب 54 و 59 درصد محاسبه می‌شود. یعنی به طور میانگین 56٪ از خوراک به کنسانتره منتقل می‌شود. این بدان معناست که 44٪ از خوراک به صورت باطله کم عیار از خوراک ورودی مدار فلوتاسیون حذف خواهد شد.

5- نتیجه‌گیری

- نتایج آزمایش‌های مایع سنگین نشان داد که امکان حذف51٪ باطله کم عیار از بار ورودی مدار فلوتاسیون وجود دارد. با حذف این بخش عیار بار ورودی پس از آرایش اولیه تقریباً دو برابر شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

- محدوده دانه‌بندی 11-2 میلی‌متر و چگالی $2/75\ g/cm^3$ برای انجام آزمایش‌های نیمه صنعتی مناسب تشخیص داده شد.
- تاثیر پارامترهای فشار و شیب سیکلون بر میزان توزیع سرب روی در کنسانتره و عیار سرب روی در باطله دارای اثر متقابل هستند، درحالیکه تاثیر پارامتر نسبت واسطه به بار، با دو پارامتر فشار و شیب اثر متقابلی ندارد.
- نرخ تغییرات عیار سرب باطله در سرریز سیکلون در مقابل میزان تغییرات سه پارامتر فوق ناچیز است.
- افزایش فشار بار ورودی سیکلون از 3 psi به 4 psi موجب کاهش توزیع سرب و روی در ته ریز سیکلون و افزایش عیار آنها در سرریز می‌گردد که نتیجه نامطلوبی است. لذا نقطه بهینه فشار بایستی بین 2 psi و 3psi باشد.
- در کل شرایط بهینه‌سازی، میزان توزیع سرب کنسانتره در شیب 15 درجه به کمترین مقدار خود رسیده است.
- انتخاب شیب سیکلون ارتباط تنگاتنگی با فشار بار ورودی به سیکلون دارد. لذا با توجه به فشار مناسب بار ورودی بین 2 psi تا 3 psi، شیب 11 درجه بهترین گزینه برای شیب سیکلون خواهد بود.
- با کاهش نسبت واسطه به بار (افزایش بار ورودی) در سیکلون، توزیع سرب و روی افزایش می‌یابد.
- با پردازش داده‌های خروجی حاصل از طراحی آزمایش‌ها به کمک نرم افزار Design Expert شرایط بهینه پارامترها در فشار بار ورودی 3 psi، شیب سیکلون 11 درجه و نسبت واسطه به بار 2/8 تعیین می‌گردد.
- در شرایط بهینه، چنانچه عیار سرب و روی خوراک به ترتیب 1/84٪ و 5/87٪ باشد، توزیع سرب و روی 83/9 ٪ و 88/4 ٪ و عیار سرب و روی در باطله 1/65٪ و 1/73 ٪ خواهد شد.
- با استفاده از محاسبات متالورژیکی در شرایط بهینه، عیار سرب و روی در کنسانتره به ترتیب 2/86٪ و 8/66٪ می‌باشد. در این شرایط 44٪ بار ورودی به‌عنوان باطله حذف خواهد شد. این باطله از نظر وزنی شامل 16٪ سرب و 11/6٪ روی خواهد بود.
- نتایج بدست آمده موید این مسئله است که امکان تعمیم نتایج حاصل از آزمایش‌های مایعات سنگین به سیکلون‌های واسطه سنگین نیمه صنعتی وجود دارد.

6- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از همکاری‌های صمیمانه مدیریت محترم شرکت براونر تهران جناب آقای مهندس حجازی، آقای مهندس علمدارلو قائم مقام مدیر عامل و سرپرست محترم کارخانه لکان آقای مهندس رحیمی قدردانی می‌شود.

منابع

[1] رضایی، بهرام؛ 1377؛ " **تکنولوژی فرآوری مواد معدنی (پرعیارسازی ثقلی)**"، چاپ اول، دانشگاه هرمزگان.

[2] Richard O Burt; 1986; "*Selection of Gravity Concentration Equipment*", Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits, L.D Hartzog and others, Society of mining engineers, inc., Littleton, Colorado, U.S.A by Port City Press, Baltimore, Maryland, chapter 13, pp. 195.

[3] نعمت اللهی، حسین؛1381؛ " **کانه آرایی**"، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، جلد اول.

[4] Tim Napier and Barry A. Wills; 2006; *"Mineral Processing Technology*", Elsevier Ltd, Seventh Edition, pp. 248-249.

[5] John G. Rayner and T.J. Napier-Munn; 2002; "*A mathematical model of recovery of dense medium magnetic in the wet drum magnetic separator*", International journal of mineral processing. 69, pp. 157-173.

[6] A.K. Mukherjee, R. Sripriya, P.V.T. Rao, P. Das 2003,*"Effect of increase in feed inlet pressure on feed rate of dense media cyclone*", Elsevier Ltd, International journal of mineral processing, pp. 259-260.

[7] Lynch, A.J., Rao, T.C., Bailey, C.W.; 1975; "*The influence of design and operating variables on the capacities of hydrocyclone classifiers*", International Journal of Mineral Processing, Vol. 2, pp. 29ت37.

[8] Plitt, L.R.; 1976; "*A mathematical model of the hydrocyclone classifier*", CIM Bulletin, Vol. 69, pp. 114ت123.

www.SID.ir

Archive of SID

[9] Napier-Munn, T.J, Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T.; 1999; "*Mineral comminution circuits their operation and optimization*". JKMRC, pp. 309ت319.

[11] صامعی، جواد؛ 1384؛ "**تجزیه و تحلیل مدار خردایش کارخانه فرآوری لکان**"، پایان نامه دوره کارشناسی، دانشگاه علم و صنعت ایران (واحد اراک)

[11] صامعی، جواد؛ 1387؛ "**بررسی امکان تغییر مدار فلوتاسیون کارخانه فرآوری سرب روی لکان به ثقلی-فلوتاسیون**"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد

[12] Sripriya, R..; 2001; "*Critical evolution of factors affecting the operation of dense medium cyclones treating medium coking coals*"; Int. J. Miner. Process. 63, pp. 191-206.

[13] حسنی پاک ، علی اصغر؛1381؛ " **نمونه برداری معدنی (اکتشاف ، استخراج و فرآوری)**"، انتشارات دانشگاه تهران

[14] Mohloana K. Magwai, J.B; 2007; *"Fundamentals on the spigot capacity of dense medium cyclones*", Elsevier Ltd, minerals engineering, pp. 575-580.

[15] Robert A.Reevs; 2002; *"Types and characteristics of Heavy-Media Separators and Flow sheets*", Mineral Processing Plant Design and Control Proceedings, L. Mular, N. Halbe, and Derek J. Barratt, Society for mining, Metallurgy, and Exploration, Litteleton, Colorado U.S.A, Vol. 2, pp. 962-974.

[16] Taguchi G.; 1987; "*System of experimental design*", Vol. 1, 2, KRAVS international publication

[17] W. M. Aubrey, Jr. and R. L. Stone; 1986; "*Laboratory testing for gravity concentration circuit design*", Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits, L.D Hartzog and others, Society of mining engineers, inc., Littleton, Colorado U.S.A by Port City Press, Baltimore, Maryland, chapter 29, p. 445.

پی‌نوشت

[1] De Gelder
[2] Dhalstrom
[3] Lynch
[4] Plitt
[5] Napier-Munn
[6] A.K. Mukherjee
[7] John G. Rayner

www.SID.ir