نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دوره سوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۹۹ تا ۱۱۰
Vol. 3, No. 2, Summer 2018, pp. 99-110

یادداشت فنی

تعیین عوامل بهینه سیکلون واسطه سنگین برای بیشینه کردن عیار و بازیابی سرب و روی کارخانه لکان

سید حسین دری[۱]، محمود عبدالهی[۲*]، سید جواد کلینی[۳]، عبدالمطلب حاجتی[۴]

۱- کارشناسی ارشد، فراوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد، فراوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار، فراوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس
۴- استادیار، فراوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

(دریافت ۱۳۹۷/۰۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۱۰)

چکیده

سیکلون واسطه سنگین یکی از تجهیزات مهم فرآوری مواد معدنی به ویژه در مرحله پیش‌فرآوری برای موادی مانند سرب و روی است. عوامل مختلفی بر روی عملکرد و میزان عیار و بازیابی سیکلون واسطه سنگین موثر است. تحقیق حاضر در کارخانه سرب و روی لکان واقع در استان مرکزی انجام گرفت. کانسنگ مورد مطالعه حاوی گالن و اسفالریت به عنوان کانه‌های اصلی و مقادیری از سیلیس، کلسیت، دولومیت به عنوان کانی‌های باطله است. در این تحقیق پس از نمونه‌گیری‌های اولیه، آنالیز سرندی و عیارسنجی نمونه‌های ورودی و خروجی سیکلون واسطه سنگین در هر طبقه ابعادی انجام شد. به علت نمونه‌گیری در زمان‌های متفاوت در آزمایش‌ها از دو نوع خوراک با دو عیار متفاوت استفاده شده است، بنابراین ۴ سری آزمایش با عوامل کارخانه در ۴ دانه‌بندی مختلف با عیار اولیه سرب و روی به ترتیب برابر ۱٫۱ و ۴٫۴ درصد و سپس برای بررسی عوامل موثر از جمله چگالی، فشار ورودی و شیب، در نرم‌افزار DX7، ۱۲ آزمایش در دو سطح با عیار اولیه سرب و روی به ترتیب برابر ۰٫۵ و ۳٫۱ درصد انجام پذیرفت. در نهایت پس از بهینه‌سازی مقادیر بهینه چهار عامل دانه‌بندی، چگالی، فشار ورودی و شیب به ترتیب ۱+ ۶٫۳۵- میلی‌متر، ۲ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰٫۵ بار و ۲۳٫۸۷ درجه به دست آمد. با اعمال عوامل بهینه به دست آمده در سیکلون واسطه سنگین عیار و بازیابی سرب به ترتیب برابر ۰٫۸۱ و ۷۶٫۳۸ درصد و عیار و بازیابی روی به ترتیب برابر ۴٫۴ و ۷۵٫۹۸ درصد به دست آمد.

کلمات کلیدی

سیکلون واسطه سنگین، چگالی واسطه، فشار ورودی، شیب سیکلون واسطه سنگین، کارخانه سرب و روی لکان.

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: minmabd@modares.ac.ir

۱- مقدمه

سیکلون واسطه سنگین یک دستگاه جداکننده اولیه بر مبنای اختلاف چگالی ذرات است[۲،۱]. بر طبق تحقیقات انجام شده تاکنون عوامل مختلفی بر سیکلون واسطه سنگین موثر است که با بهینه‌سازی این عوامل می‌توان عملکرد سیکلون واسطه سنگین را بهبود و در نتیجه عیار و بازیابی را افزایش داد. برخی از این عوامل عبارت‌اند از: توزیع ابعادی ذرات خوراک، شکل ذرات خوراک، میزان چگالی مواد نزدیک به چگالی واسطه، فشار بار ورودی، میزان اختلاف چگالی مواد، چگالی و شکل ذرات واسطه، درصد جامد سیکلون واسطه سنگین، گرانروی واسطه، آهنگ جدا کردن واسطه[۳]. صامعی و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی برخی از این عوامل یاد شده از جمله چگالی واسطه، فشار ورودی و شیب را برای بررسی امکان راه‌اندازی سیکلون واسطه سنگین در کارخانه سرب و روی لکان بررسی کردند که عوامل بهینه به دست آمده از شیب ۱۰ درجه، فشار ورودی psi ۳ و نسبت واسطه به بار ۲٫۸ است. با اعمال این عوامل عیار سرب و روی ۲٫۸۶ و ۸٫۶۶ درصد و بازیابی ۸۳٫۹ و ۸۸٫۴ درصد به دست آمد[۳]. در تحقیق دیگری شرایط عملیاتی سیکلون واسطه سنگین مانند مشخصات واسطه، پایداری و میزان تغییر شکل آن مورد بررسی قرار گرفته است. امینی و همکاران (۲۰۱۶) در نمونه زغال‌سنگ شرایط سیال درون سیکلون واسطه سنگین بر کارایی آن را بررسی کردند. در این تحقیق با نرم‌افزار، تغییرات چگالی در شعاع سیکلون واسطه سنگین مورد بررسی قرار گرفته به گونه‌ای که بهترین نتایج با کاهش دهانه خروجی سیکلون و افزایش چگالی واسطه تا مقادیر بهینه به دست آمده است[۴]. اسریپریا و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقی دیگر عواملی مانند آهنگ جریان واسطه، فشار ورودی، ضریب جدایش واسطه و دانه‌بندی ورودی را در نمونه زغال‌سنگ مدل کرده‌اند[۵]. در تحقیق حاضر مانند مرجع شماره ۲ عوامل چگالی واسطه، فشار ورودی و شیب سیکلون واسطه سنگین مورد بررسی قرار گرفته است و علاوه بر آن عامل دانه‌بندی (یکی از عوامل موثر بر کارایی سیکلون واسطه سنگین)، با استفاده از محدوده‌های ابعادی مختلف برای دست‌یابی به یک دانه‌بندی بهینه نیز در سیکلون واسطه سنگین کارخانه سرب و روی لکان مورد بررسی قرار گرفته است [۷،۶].

کارخانه سرب و روی لکان در ۴۶ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان اراک در استان مرکزی واقع شده است. دسترسی به کارخانه از طریق جاده اراک- بروجرد و یا اراک- خمین امکان‌پذیر است. این کارخانه در فاصله ۲۵ کیلومتری معدن سرب و روی عمارت قرار دارد و اکنون خوراک آن نیز از همین معدن تامین می‌شود[۲]. کانسنگ مورد مطالعه حاوی گالن و اسفالریت به عنوان کانی‌های اصلی و مقادیر زیادی سیلیس، کلسیت، دولومیت به عنوان کانی‌های باطله و مقادیر ناچیزی نقره است. خوراک کارخانه به مقدار حدود ۷۰۰ تن در روز کانسنگ سرب و روی از معدن عمارت تامین می‌شود. عیار اولیه کانسنگ در حدود ۰٫۵ تا ۱٫۵ درصد سرب به صورت کانی گالن و در حدود ۳ تا ۴ درصد روی به صورت کانی اسفالریت است. خوراک اولیه کارخانه پس از خردایش با دو سنگ‌شکن فکی و یک سنگ‌شکن مخروطی به ابعاد کمتر از ۱۲ میلی‌متر می‌رسد. مواد خرد شده از سنگ‌شکن مخروطی برای تر شدن وارد محفظه استوانه‌ای[1] می‌شود و پس از آن وارد کلاسیفایر مارپیچی می‌شود. در کلاسیفایر مارپیچی مواد خردشده زیر یک میلی‌متر مستقیما وارد آسیای دوم شده و پس از آن وارد مدار فلوتاسیون می‌شود و مواد درشت‌تر از یک میلی‌متر برای یک مرحله پرعیارسازی اولیه وارد سیکلون واسطه سنگین می‌شود و پس از آن به مدار فلوتاسیون راه می‌یابد. این سیکلون واسطه سنگین عیار سرب را به حدود ۲ درصد و روی را به حدود ۶ درصد می‌رساند. در این تحقیق تعیین شرایط و عامل‌های بهینه سیکلون واسطه سنگین برای دستیابی به بیشترین عیار و بازیابی سرب و روی در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور چهار عامل دانه‌بندی، چگالی واسطه، فشار ورودی و شیب سیکلون واسطه سنگین مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات آزمایشگاهی

برای تحقق اهداف موردنظر و دستیابی و به نتایج معتبر روش‌ها و دستگاه‌ها و شرایط مختلفی در این تحقیق مورداستفاده قرار گرفت. برای خردایش نمونه‌ها از سنگ‌شکن استوانه‌ای استفاده شد. از دستگاه پودرکن دیسکی برای پودر کردن مواد به منظور عیارسنجی سرب و روی استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های سیکلون واسطه سنگین از سیکلون واسطه سنگین واقع در دانشگاه صنعتی اراک پس از انجام تعمیرات و اصلاحات بر روی آن استفاده شد (شکل ۱) [۸]. طراحی آزمایش‌های عوامل سیکلون واسطه سنگین نیز با نرم‌افزار طراحی آزمایش(DX7) انجام شد. در انجام آزمایش‌های سیکلون واسطه سنگین از

فروسیلیس به عنوان واسطه آزمایش با چگالی ۶۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و با دانه‌بندی کمتر از ۲۰۰ میکرون استفاده شد.

شکل ۱: نمایی از سیکلون واسطه سنگین آزمایشگاهی

۲-۲- روش آماده‌سازی نمونه

اولین نمونه‌گیری برای تعیین فازهای کانی‌شناسی و عناصر موجود در خوراک کارخانه انجام شد. در این نمونه از محصول سنگ‌شکن مخروطی به میزان ۴۰ کیلوگرم نمونه تهیه شد و در نهایت به میزان ۱۲۰۰ گرم از کل نمونه تهیه شده به عنوان نمونه معرف انتخاب و پس از پودر کردن آن دو نمونه ۵ گرمی برای آنالیز XRD و XRF انتخاب شد. دومین نمونه‌گیری در یک نوبت دیگر برای طبقه‌بندی، تعیین d_{80} و عیارسنجی هر طبقه انجام شد. به همین منظور از محصول سنگ‌شکن مخروطی، خوراک، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه سنگین کارخانه هر یک به میزان ۲۲، ۲۳٫۶۸۰، ۲۳٫۴۵۰ کیلوگرم و نمونه تهیه شد و پس از آن هر کدام از آن‌ها در ۱۱ طبقه تجزیه سرندی شد و d_{80} هر یک به دست آمد و عیارسنجی سرب و روی هر طبقه انجام گرفت. سومین نمونه‌گیری برای آزمایش‌های دانه‌بندی و نمونه‌گیری آخر برای آزمایش‌های سایر عوامل سیکلون واسطه سنگین مانند چگالی واسطه، فشار ورودی و شیب سیکلون واسطه سنگین انجام شد.

۲-۳- روش آنالیز نمونه

آنالیز فازهای کانی‌شناسی و عنصری خوراک کارخانه به ترتیب با روش‌های XRD و XRF انجام شد. برای تعیین عیار سرب و روی در نمونه‌های طبقه‌بندی شده و آزمایش‌های سیکلون واسطه سنگین از روش تیتراسیون استفاده شد.

۲-۴- طراحی آزمایش‌های سیکلون واسطه سنگین

پس از انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و تعیین مقدار بهینه، تاثیر سایر عوامل سیکلون واسطه سنگین بررسی و آزمایش شد، بنابراین با توجه به نرم‌افزار Design Expert برای طراحی آزمایش‌ها ابتدا طرح فاکتوریل با ۴ نقطه مرکزی انتخاب شد. در این آزمایش‌ها دانه‌بندی ثابت و برابر با اندازه بهینه به دست آمده در نظر گرفته شد و هرکدام از این عامل‌ها در دو سطح مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شد.

جدول ۱: سه عامل آزمایشی انتخابی و سطوح آن‌ها

	عامل‌ها	سطح پایین	سطح بالا
A	چگالی واسطه (کیلوگرم/ مترمکعب)	۲	۲٫۵
B	فشار ورودی (بار)	۰٫۵	۱٫۲
C	شیب (درجه)	۲۰	۳۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آنالیز خوراک کارخانه

نتایج آنالیز XRF خوراک کارخانه در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس این جدول بیش از ۶۰ درصد نمونه از کوارتز تشکیل شده است. میزان سرب و روی نیز در این نمونه به ترتیب ۱٫۸۸۳ و ۳٫۶۲۱ درصد است. همچنین ترکیبات سیلیس، آهن و کلسیم نیز دیده می‌شود. در آنالیز XRD وجود کانی‌های گالن و اسفالریت به عنوان کانی‌های اصلی سرب و روی و کانی‌های کوارتز، کلسیت، دولومیت به صورت کانی‌های باطله در نمونه را نشان می‌دهد.

۳-۲- نتایج d_{80} نمونه‌ها

در نتایج طبقه‌بندی نمونه خوراک سیکلون واسطه سنگین بیشترین توزیع ذرات در این نمونه در محدوده ابعادی ۲ تا ۹٫۵ میلی‌متر و حدود ۸ درصد از کل نمونه شامل ذرات زیر

جدول ۲: آنالیز شیمیایی نمونه به روش XRF

L.O.I	۶٫۶۳	CaO	۹٫۳۴
Na_2O	۱٫۰۸	Ni	۰٫۰۵۱
MgO	۱٫۲۱۳	Fe_2O_3	۲٫۲۲۲
Al_2O_3	۴٫۰۳۹	MnO	۰٫۲۰۸
SiO_2	۶۴٫۴۸۱	TiO_2	۰٫۱۴
P_2O_5	۰٫۰۴	Zn	۳٫۶۲۱
SO_3	۴٫۰۸۵	Pb	۱٫۸۸۳

یک میلی‌متر است. در نمونه کنسانتره سیکلون محدوده ابعادی ۶٫۳۵ تا ۹٫۵ میلی‌متر نزدیک به ۳۰ درصد از کل نمونه را تشکیل می‌دهد. نکته دیگر ابعاد کمتر از ۲ میلی‌متر است که فقط ۹ درصد از کل نمونه را تشکیل می‌دهند. در نمونه باطله سیکلون واسطه سنگین بیشترین توزیع ذرات حدود ۲۰ درصد در محدوده ابعادی ۳٫۳۵ تا ۴٫۷۵ میلی‌متر است. نتایج d_{80} هر یک از نمونه‌های محصول سنگ‌شکن مخروطی، خوراک، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه سنگین به ترتیب برابر با ۶۸۶۰، ۶۶۰۰، ۷۸۲۰، ۶۲۲۰ میکرون به دست آمد. d_{80} نمونه خوراک سیکلون واسطه سنگین بین کنسانتره و باطله است.

۳-۳- نتایج عیارسنجی نمونه‌های طبقه‌بندی شده

عیارسنجی طبقات مختلف برای چهار نمونه محصول سنگ‌شکن مخروطی، خوراک، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه سنگین انجام شد. بر طبق نتایج به دست آمده در نمونه خوراک سیکلون واسطه سنگین توزیع فلز سرب و روی به ترتیب حدود ۲۸ و ۲۳ درصد در دانه‌بندی زیر یک میلی‌متر دیده شد که این خود می‌تواند ناشی از عدم جدایش دقیق ذرات زیر یک میلی‌متر در کلاسیفایر و یا خطای آن باشد. نکته دیگر ذرات درشت‌تر از ۹٫۵ میلی‌متر است که توزیع فلز سرب و روی در این ابعاد کم است. در نمونه باطله سیکلون واسطه سنگین دیده شد که توزیع فلز سرب و روی برای ابعاد کمتر از یک میلی‌متر به ترتیب ۱۲٫۱۴ و ۱۲٫۱۷ درصد است. به عبارت دیگر حدود ۱۲ درصد از فلز سرب و روی که در ابعاد کمتر از یک میلی‌متر است بر طبق این نتایج وارد باطله می‌شود. همچنین ذرات درشت‌تر از ۹٫۵ میلی‌متر نیز در باطله توزیع فلز کمی دارند.

۳-۴- نتایج آزمایش‌های تاثیر دانه‌بندی در عیار و بازیابی سیکلون واسطه سنگین

بر اساس نتایج عیارسنجی هر طبقه در نمونه خوراک، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه سنگین، ۴ سری آزمایش دانه‌بندی در دانه‌بندی‌های ۱۰-، (۱۰+ ۱-)، ۶٫۳۵ - و (۶٫۳۵+ ۱-) میلی‌متر انجام گرفت. بر اساس این آزمایش‌ها تمام عامل‌ها به جز دانه‌بندی ثابت و بر مبنای عامل‌های کارخانه در نظر گرفته شد و فقط دانه‌بندی تغییر داده شد.

۳-۴-۱- آزمایش دانه‌بندی ۱۰- میلی‌متر

در آزمایش اول نمونه با دانه‌بندی کارخانه بدون هیچ‌گونه تغییری وارد سیکلون واسطه سنگین آزمایشگاهی شد و پس از نمونه‌گیری از ته‌ریز (کنسانتره) و سرریز (باطله) آن و عیارسنجی این دو مقادیر عیار و بازیابی سرب و روی به دست آمد. نتایج این آزمایش در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. در این عیار خوراک و عیار سرب و روی در کنسانتره و باطله و بازیابی سرب و روی به ترتیب آورده شده است.

جدول ۳: نتایج عیار و بازیابی سرب سیکلون واسطه سنگین در دانه‌بندی ۱۰- میلی‌متر

عیار خوراک (درصد)	عیار سرب در کنسانتره (درصد)	عیار سرب در باطله (درصد)	بازیابی سرب (درصد)
۱٫۱	۱٫۱۹	۰٫۶۹	۸۷٫۲۷

جدول ۴: نتایج عیار و بازیابی روی در سیکلون واسطه سنگین در دانه‌بندی ۱۰- میلی‌متر

عیار خوراک (درصد)	عیار روی در کنسانتره (درصد)	عیار روی در باطله (درصد)	بازیابی روی (درصد)
۴٫۴	۵٫۹۶	۲٫۶۹	۷۰٫۸۶

۳-۴-۲- آزمایش دانه‌بندی (۱+ ۱۰-) میلی‌متر

در این آزمایش ابعاد زیر ۱ میلی‌متر با سرند ۱۶ مش از خوراک جدا و ابعاد (۱+ ۱۰-) میلی‌متر برای بررسی تاثیر حذف ابعاد ریز وارد سیکلون واسطه سنگین شد. نتایج عیارسنجی این آزمایش در جدول‌های ۵ و ۶ آمده است.

۳-۴-۳- آزمایش دانه‌بندی ۶٫۳۵- میلی‌متر

در این آزمایش ذرات با ابعاد بزرگ‌تر از ۶٫۳۵ میلی‌متر با استفاده از سرند ۰٫۲۵ اینچ برای بررسی تاثیر حذف ابعاد درشت

جدا و سپس با استفاده از سنگ‌شکن استوانه‌ای (برای جلوگیری از تولید ذرات نرمه) خرد و به نمونه اضافه شد. نتایج عیارسنجی این آزمایش در جدول‌های ۷ و ۸ آمده است.

جدول ۵: نتایج عیار و بازیابی سرب در سیکلون واسطه سنگین در دانه‌بندی (۱+ ۱۰-) میلی‌متر

عیار خوراک (درصد)	عیار سرب در کنسانتره (درصد)	عیار سرب در باطله (درصد)	بازیابی سرب (درصد)
۱٫۱	۱٫۵۵	۰٫۷	۶۷٫۷۴

جدول ۶: نتایج عیار و بازیابی روی در سیکلون واسطه سنگین در دانه‌بندی (۱+ ۱۰-) میلی‌متر

عیار خوراک (درصد)	عیار روی در کنسانتره (درصد)	عیار روی در باطله (درصد)	بازیابی روی (درصد)
۴٫۴	۷٫۲۳	۲٫۷۳	۶۰٫۹۵

جدول ۷: نتایج عیار و بازیابی سرب در سیکلون واسطه سنگین در دانه‌بندی ۶٫۳۵- میلی‌متر

عیار خوراک (درصد)	عیار سرب در کنسانتره (درصد)	عیار سرب در باطله (درصد)	بازیابی سرب (درصد)
۱٫۱	۱٫۴۵	۰٫۶۵	۷۳٫۸۶

جدول ۸: نتایج عیار و بازیابی روی در سیکلون واسطه سنگین در دانه‌بندی ۶٫۳۵- میلی‌متر

عیار خوراک (درصد)	عیار روی در کنسانتره(درصد)	عیار روی در باطله (درصد)	بازیابی روی (درصد)
۴٫۴	۷٫۷۵	۲٫۶۱	۶۱٫۳۴

۳-۴-۴- آزمایش دانه‌بندی (۱+ ۶٫۳۵-) میلی‌متر

در این آزمایش ذرات خوراک با دانه‌بندی کمتر از یک میلی‌متر با سرند ۱۶ مش برای حذف تاثیر ذرات ریز جدا شد و ذرات با ابعاد بزرگ‌تر از ۶٫۳۵ میلی‌متر با استفاده از سرند ۰٫۲۵ اینچ جدا و با سنگ‌شکن استوانه‌ای خرد و پس از عبور از سرند ۰٫۲۵ اینچ مجدد به نمونه اضافه شد. نتایج عیارسنجی این آزمایش در جدول‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود.

جدول ۹: نتایج عیار و بازیابی سرب در سیکلون واسطه سنگین در دانه‌بندی (۱+ ۶٫۳۵-) میلی‌متر

عیار خوراک (درصد)	عیار سرب در کنسانتره (درصد)	عیار سرب در باطله (درصد)	بازیابی سرب (درصد)
۱٫۱	۱٫۷۵	۰٫۶۷	۶۳٫۵۵

جدول۱۰: نتایج عیار و بازیابی روی در سیکلون واسطه سنگین در دانه‌بندی (۱+ ۶٫۳۵-) میلی‌متر

عیار خوراک (درصد)	عیار روی در کنسانتره (درصد)	عیار روی در باطله (درصد)	میانگین بازیابی روی (درصد)
۴٫۴	۶٫۸۱	۲٫۴۴	۶۹٫۴۰

در این آزمایش عیار سرب نسبت به سه آزماش دیگر افزایش پیدا کرده است. همچنین عیار روی نیز بالا است. این نتایج مطابق با نتایج به دست آمده در عیارسنجی هر طبقه، دانه‌بندی (۱+ ۶٫۳۵-) میلی‌متر بهترین محدوده دانه‌بندی است زیرا با حذف ذرات ریز (ذرات با ابعاد زیر یک میلی‌متر) و ذرات درشت (ذرات با ابعاد بالای ۶٫۳۵) و خرد شدن آن میزان توزیع سرب و روی در این محدوده از دانه‌بندی افزایش می‌یابد و در نتیجه آن می‌توان با بهینه کردن سایر عوامل در این دانه‌بندی امکان افزایش عیار و بازیابی سرب و روی را بررسی کرد.

۳-۵- نتایج عیار و بازیابی آزمایش‌های طراحی شده بر مبنای عامل‌های انتخابی

نتایج عیار و بازیابی سرب و روی برای ۱۲ آزمایش انجام شده در یک بلوک در جدول ۱۱ آورده شده است. مطابق با این جدول ۱۲ آزمایش در طرح فاکتوریل با سطوح مختلف عوامل انتخابی به همراه چهار پاسخ عیار و بازیابی سرب و روی دیده می‌شود. در این جدول سطوح A، B و C به ترتیب چگالی، فشار ورودی و شیب است. خوراک این آزمایش با آزمایش‌های تاثیر دانه‌بندی متفاوت است، بنابراین میزان عیار سرب و روی در خوراک این آزمایش‌ها ۰٫۵ و ۳٫۱ درصد به دست آمده است.

جدول ۱۱: نتایج عیار و بازیابی برای آزمایش‌های طراحی‌شده در نرم‌افزار DX7

آزمایش	سطوح			پاسخ عیار		پاسخ بازیابی	
	A	B	C	Pb	Zn	Pb	Zn
۱	۲٫۵	۱٫۲	۳۰	۰٫۶۱	۳٫۴۴	۷۸٫۷	۸۴٫۵۸
۲	۲	۰٫۵	۲۰	۰٫۶	۳٫۸۹	۸۱٫۲۹	۸۴٫۵۹
۳	۲٫۲۵	۰٫۸۵	۲۵	۰٫۵۷	۳٫۶۹	۸۰٫۷۵	۸۸
۴	۲٫۵	۰٫۵	۲۰	۰٫۷۱	۴٫۱۷	۶۹٫۲۶	۸۳٫۰۶
۵	۲٫۲۵	۰٫۸۵	۲۵	۰٫۶۳	۳٫۴۹	۸۰٫۵	۸۹٫۷۹
۶	۲٫۵	۱٫۲	۲۰	۰٫۸۷	۴٫۲۸	۷۷٫۹۱	۷۵٫۸۴
۷	۲٫۲۵	۰٫۸۵	۲۵	۰٫۶	۳٫۴۲	۸۰	۹۰٫۹۵
۸	۲	۰٫۵	۳۰	۱	۵٫۱۹	۶۷٫۵	۶۵٫۶۶
۹	۲٫۵	۰٫۵	۳۰	۰٫۷۸	۳٫۵۴	۶۵	۸۳٫۷۵
۱۰	۲	۱٫۲	۲۰	۰٫۹۳	۴٫۰۳	۷۴٫۶۵	۷۰٫۱۲
۱۱	۲٫۲۵	۰٫۸۵	۲۵	۰٫۶	۳٫۶	۸۱٫۲۹	۸۸٫۷۸
۱۲	۲	۱٫۲	۳۰	۰٫۸۸	۵٫۰۴	۶۴٫۳۳	۶۸٫۱۱

دانه‌بندی این آزمایش‌ها نیز (۱+ ۶٫۳۵-) میلی‌متر است. پس از اتمام نتایج عیارسنجی، نتایج عیار و بازیابی برای دو عنصر سرب و روی مطابق با جدول ۱۱ در نرم‌افزار وارد و سپس در قسمت آنالیز پاسخ‌ها، چهار پاسخ عیار و بازیابی سرب و روی تحلیل شد.

۳-۵-۱- تحلیل نتایج عیار سرب

جدول ۱۲ جدول آنوا تولید شده در نرم‌افزار است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود مدل انتخابی معنادار و Lack Of Fit بی‌معنا است که نشان می‌دهد مدل انتخابی مدل درستی است. بر طبق این جدول همان‌طور که دیده می‌شود تاثیرات متقابل پارامترهای انتخابی دوبه‌دو بررسی شده و در جدول آنوا آورده شده است. در این جدول همان‌طور که دیده می‌شود اثر انحنا[۲] معنادار است که این بدین معنا است که باید سطوح بیشتری انتخاب شود، بنابراین اگر سطوح بیشتری در نظر گرفته می‌شد، انحنا در نمودارها به دست می‌آمد و در جدول آنوا غیر معنادار می‌شد. به عبارت دیگر از آنجایی که طرح آزمایشی فاکتوریال دو سطحی است و از میان دو نقطه فقط یک خط

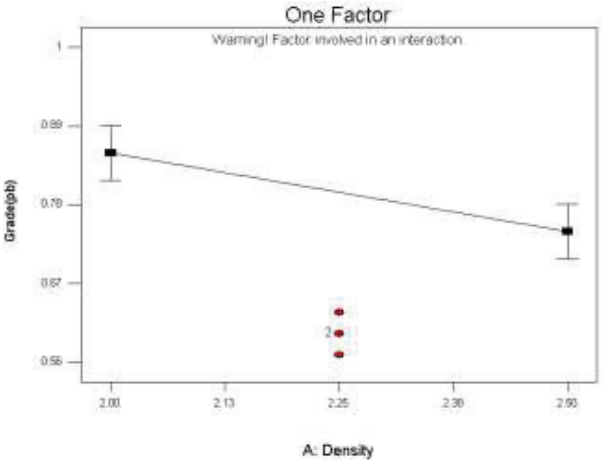
جدول ۱۲: جدول آنوا به دست‌آمده برای تحلیل نتایج عیار سرب

عامل	مقدارF	مقدارP	میانگین مربعات
A	۹٫۴۹	۰٫۰۱۷۸	۰٫۰۲۴
AC	۱۴٫۲۹	۰٫۰۰۶۹	۰٫۰۳۶
BC	۲۹٫۸۲	۰٫۰۰۰۹	۰٫۰۷۶
مدل	۱۷٫۸۷	۰٫۰۰۱۲	۰٫۱۴
L.O.F	۶٫۶۹	۰٫۰۷۵۲	۰٫۰۱۶
اثر انحنا	۴۰٫۷۹	۰٫۰۰۰۴	۰٫۱

صاف عبور می‌کند، انحنا در این طرح آزمایشی قابل رویت نیست و برای مشاهده دقیق‌تر تغییرات عیار نهایی سرب در اثر تغییرات فاکتورها باید سطوح بیشتری در نظر گرفته شود. اثر انحنا در سه پاسخ دیگر معنادار است که این تحلیل انجام شده برای آن‌ها نیز صدق می‌کند.

همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود علاوه بر معناداری مدل انتخابی میزان انحنا نیز معنادار شده است، به‌گونه‌ای که نشان‌دهنده این نکته است که بر داده‌ها منحنی منطبق می‌شود.

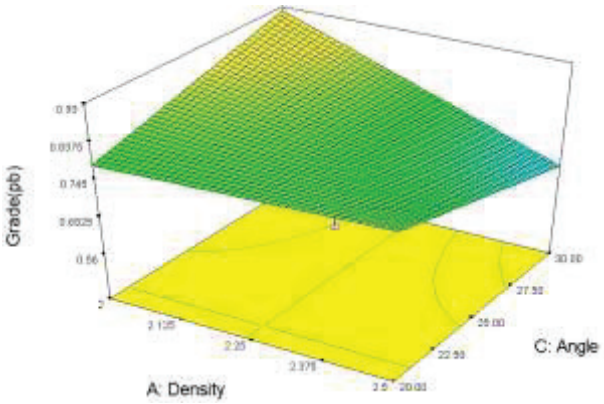
همچنین در این جدول در قسمت p-value میزان تاثیر عوامل مختلف دیده می‌شود. بر طبق این جدول در سطح اعتماد مهندسی عوامل چگالی (A)، اندرکنش چگالی و شیب (AC) و اندرکنش فشار و شیب (BC) موثرترین عوامل در عیار سرب است؛ بنابراین نتایج عامل BC یعنی اندرکنش فشار و شیب تاثیر بسیار زیادی بر روی عیار سرب دارد در حالی‌که عوامل فشار و شیب به تنهایی تاثیر آن‌چنانی بر روی عیار سرب ندارند، نمودار باقی‌مانده‌ها، نمودار نرمال و نمودار کاکس باکس برای عیار سرب به دست آمد و کنترل شد و در نهایت نمودار مدل ترسیم شد (شکل ۲).



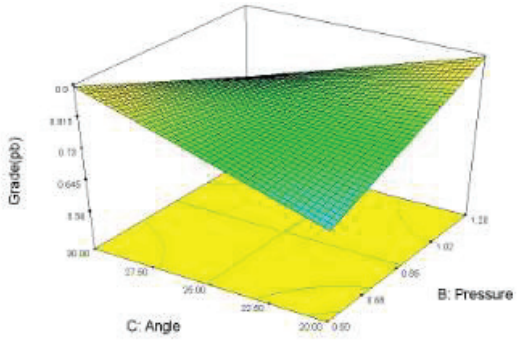
شکل ۲: نمودار تاثیر چگالی بر عیار سرب

مطابق با شکل ۲ تاثیر چگالی بر عیار دیده می‌شود. به‌گونه‌ای که بیشترین عیار سرب بر طبق این شکل در چگالی ۲ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمده است. در این چگالی عیار ۰/۸۵ درصد به دست آمده است. در این شکل با افزایش چگالی واسطه میزان گرانروی پالپ موجود در سیکلون واسطه سنگین افزایش یافته و بر انتقال صحیح ذرات به سرریز و ته‌ریز تاثیر می‌گذارد و ذرات حاوی سرب به ویژه ذرات ریز به اشتباه به طرف سرریز می‌روند.

در شکل ۳ نمودار سه‌بعدی عیار سرب با اندرکنش‌های شیب و چگالی در قسمت‌های الف و ب دیده می‌شود. در این شکل بیشترین عیار سرب در چگالی ۲ کیلوگرم بر مترمکعب و شیب ۳۰ درجه برابر با ۰/۹۲ درصد به دست می‌آید. در شکل ۴ نیز نمودار سه‌بعدی عیار سرب با عامل اندرکنش فشار و شیب دیده می‌شود. در این شکل اثر معکوس شیب و فشار بر عیار سرب دیده می‌شود. شکل نشان می‌دهد که برای رسیدن به بیشترین مقدار عیار سرب باید شیب و فشار عکس یکدیگر باشند. با توجه به شکل اگر شیب زیاد و فشار کم باشد و یا برعکس، زمان ماند ذرات در سیکلون افزایش‌یافته و جدایش سرب بهتر انجام می‌گیرد.



شکل ۳: نمودار مدل سه‌بعدی به دست‌آمده تاثیر چگالی و شیب بر عیار سرب



شکل۴: نمودار مدل سه بعدی به دست‌آمده تاثیر فشار و شیب بر عیار سرب

۳-۵-۲- تحلیل نتایج بازیابی سرب

جدول آنوا برای پاسخ بازیابی سرب مطابق با جدول ۱۳ به دست آمده است.

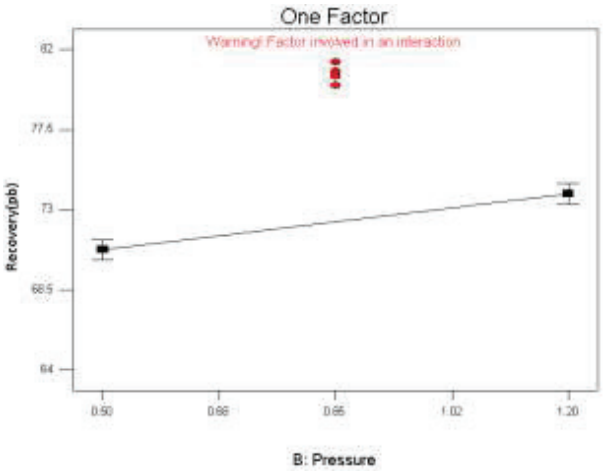
در این جدول نیز تاثیرات دوگانه پارامترها بر مبنای مدل 2FI بررسی شده است، به‌گونه‌ای که مدل انتخابی معنادار و Lack Of Fit غیر معنادار شده است. همان‌طور که در جدول ۱۳

جدول ۱۳: جدول آنوا به دست‌آمده برای تحلیل نتایج بازیابی سرب

عامل	مقدار F	مقدار P	میانگین مربعات
B	۴۱٫۳۵	۰٫۰۰۱۴	۱۹٫۶۶
C	۲۰۰	<۰٫۰۰۰۱	۹۵٫۰۸
AB	۲۷۱٫۹۵	<۰٫۰۰۰۱	۱۲۹٫۲۸
AC	۱۱۲٫۰۱	۰٫۰۰۰۱	۵۳٫۲۵
BC	۱۹٫۰۹	۰٫۰۰۷۲	۹٫۰۷
مدل	۱۲۸٫۸۸	<۰٫۰۰۰۱	۳۰۶٫۳۵
L.O.F	۲٫۶۳	۰٫۲۱۹۰	۱٫۵۱
اثر انحنا	۳۸۶٫۸۹	<۰٫۰۰۰۱	۱۸۳٫۹۳

دیده می‌شود عامل‌های فشار (B)، شیب (C)، اندرکنش چگالی و فشار (AB)، اندرکنش چگالی و شیب (AC) و اندرکنش فشار و شیب (BC) در سطح اعتماد مهندسی بر روی بازیابی سرب موثرند. مطابق با جدول آنوا به دست‌آمده عامل C و AB دارای بیشترین تاثیر در بازیابی سرب است و عامل چگالی به تنهایی تاثیری در بازیابی سرب نداشته است و به صورت اندرکنش با عوامل دیگر بر بازیابی سرب موثر است.

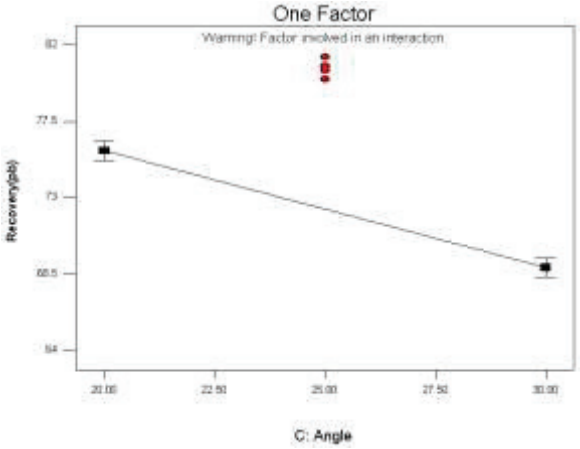
پس از جدول آنوا نمودارهای باقی‌مانده‌ها، کاکس باکس و دیگر جداول کنترل شد و نمودار مدل عامل‌های موثر به دست آمده بر بازیابی سرب به صورت دو و سه‌بعدی نمایش داده شده است. در شکل ۵ تاثیر فشار بر بازیابی سرب دیده می‌شود.



شکل ۵: نمودار مدل دوبعدی تاثیر فشار بر بازیابی سرب

در این نمودار با افزایش فشار میزان بازیابی سرب نیز افزایش می‌یابد. مطابق با این نمودار در فشار ۱٫۲ بار بیشترین بازیابی به دست آمده است. مطابق با این شکل با افزایش فشار ذرات حاوی سرب بیشتر به دیواره سیکلون نزدیک می‌شوند و از محور سیکلون فاصله می‌گیرند و وارد تەریز می‌شوند و بازیابی افزایش می‌یابد.

در شکل ۶ نمودار تاثیر شیب بر بازیابی سرب دیده می‌شود. در این نمودار برعکس نمودار ۵ با افزایش شیب میزان بازیابی سرب کاهش می‌یابد؛ بنابراین با توجه به شکل بیشترین بازیابی در شیب ۲۰ درجه برابر با ۷۵٫۷۷ درصد به دست می‌آید. افزایش شیب سبب می‌شود تا ذراتی که دارای شانس یکسانی برای رفتن به سرریز و یا تەریز را دارند به اشتباه تقسیم شوند و بخشی از ذرات حاوی سرب وارد باطله شود. همچنین افزایش شیب سبب می‌شود جدایش ذرات برحسب ابعاد بر جدایش ذرات برحسب وزن غالب شود.

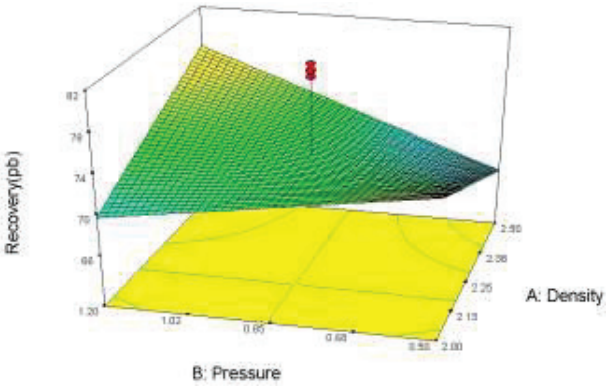


شکل ۶: نمودار مدل تاثیر شیب بر بازیابی سرب

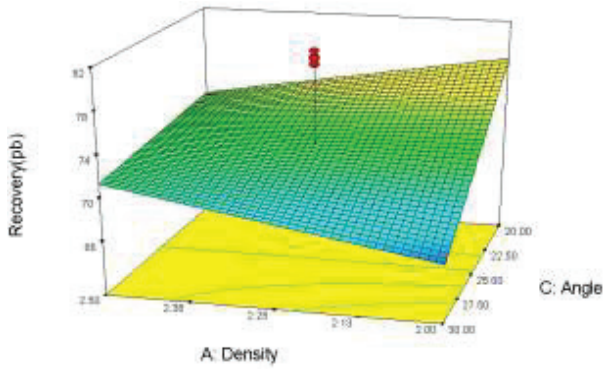
در شکل ۷ تاثیر اندرکنش عامل‌های چگالی و فشار بر روی بازیابی سرب در دو مدل دو و سه‌بعدی دیده می‌شود.

در شکل ۸ نمودار مدل تاثیر چگالی و شیب بر بازیابی سرب دیده می‌شود. در این شکل هم تاثیر عکس چگالی و شیب بر بازیابی سرب دیده می‌شود. مطابق با این شکل بیشترین بازیابی سرب در چگالی ۲ و شیب ۲۰ برابر با ۷۸٫۳۵ درصد به دست آمد.

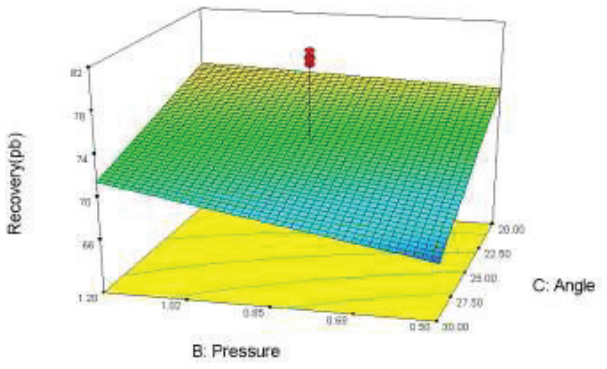
در شکل ۹ نمودارهای دو و سه‌بعدی تاثیر اندرکنش فشار و شیب بر بازیابی سرب دیده می‌شود. مطابق با این شکل بیشترین بازیابی سرب در فشار ۱٫۲ بار و شیب ۲۰ درجه به دست آمد.



شکل ۷: نمودار مدل سه‌بعدی تاثیر اندرکنش چگالی و فشار بر روی بازیابی سرب



شکل ۸: نمودارهای مدل‌های دو و سه‌بعدی تاثیر اندرکنش چگالی و شیب بر روی بازیابی سرب



شکل ۹: نمودارهای مدل‌های دو و سه‌بعدی تاثیر فشار و شیب باهم بر روی بازیابی سرب در آنالیز بازیابی سرب

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، تغییرات فشار در شیب ۳۰ درجه تغییرات بیشتری در بازیابی سرب ایجاد می‌کند.

۳-۵-۳- تحلیل نتایج عیار روی

جدول آنوا برای عیار روی به صورت جدول ۱۴ به دست آمده است. در این جدول نیز مدل انتخابی معنادار و Lack Of Fit غیر معنادار است. نمودارهای باقی‌مانده‌ها نمودار نرمال، نمودار کاکس باکس و نمودار مقادیر واقعی برای عیار روی نیز کنترل شد.

جدول ۱۴: جدول آنوا به دست آمده برای تحلیل نتایج عیار روی

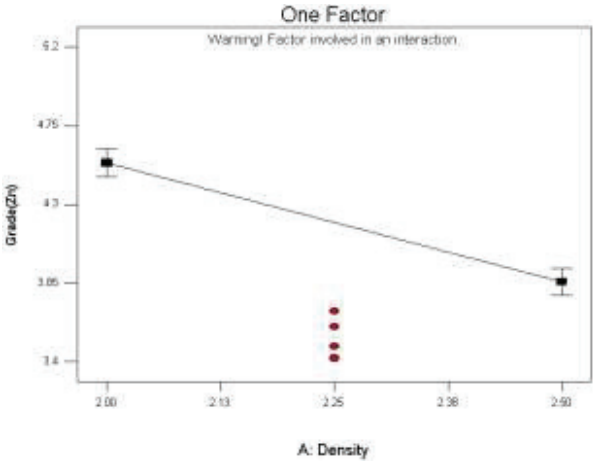
عامل	مقدار F	مقدار P	میانگین مربعات
A	۸۷٫۴۳	<۰٫۰۰۰۱	۰٫۹۲
C	۸٫۲۷	۰٫۰۲۳۸	۰٫۰۸۸
AC	۱۶۷٫۳۷	<۰٫۰۰۰۱	۱٫۷۹
مدل	۸۷٫۴۳	<۰٫۰۰۰۱	۲٫۸۰
L.O.F	۰٫۵۷	۰٫۷۰۸۳	۰٫۰۳۲
اثر انحنا	۱۰۴٫۷۷	<۰٫۰۰۰۱	۱٫۱۲

مطابق جدول ۱۴ عامل‌های چگالی (A)، شیب (C) و اندرکنش چگالی و شیب (AC) در سطح اعتماد مهندسی موثر بر عیار روی است. در این جدول عامل‌های A و AC به دلیل کمترین مقدار p-value بیشترین تاثیر را بر عیار روی دارند و مانند عیار سرب عامل فشار بر عیار روی نیز تاثیری ندارد. در شکل ۱۰ تاثیر چگالی بر عیار روی دیده می‌شود.

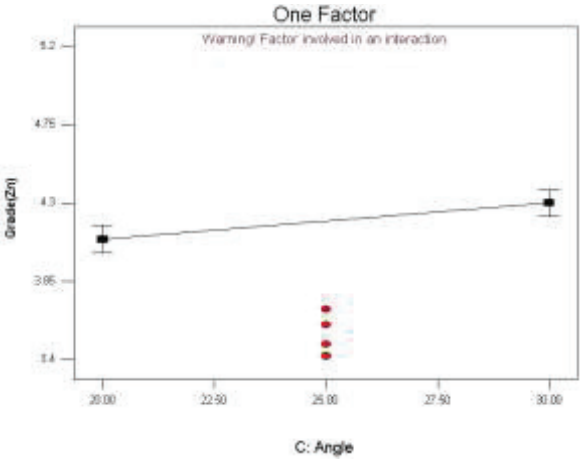
نتایج نشان می‌دهد با افزایش چگالی میزان عیار روی کاهش می‌یابد. بیشترین میزان عیار روی در چگالی ۲ کیلوگرم بر مترمکعب برابر با ۴٫۵۳ درصد و کمترین میزان عیار روی در چگالی ۲٫۵ کیلوگرم بر مترمکعب برابر با ۳٫۸۵ درصد به دست آمده است. علت این کاهش عیار این است که با افزایش چگالی واسطه میزان گرانروی پالپ موجود در سیکلون واسطه سنگین افزایش‌یافته و بر انتقال صحیح ذرات به سرریز و ته‌ریز تاثیر می‌گذارد و ذرات حاوی روی به ویژه ذرات ریز به اشتباه به طرف سرریز می‌روند. در شکل ۱۱ نمودار مدل تاثیر شیب بر عیار روی دیده می‌شود. در این نمودار با افزایش شیب عیار روی افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در شیب ۳۰ درجه عیار ۴٫۳ درصد به دست می‌آید.

۳-۵-۴- تحلیل نتایج بازیابی روی

جدول آنوا برای بازیابی روی به صورت جدول ۱۵ است.



شکل ۱۰: نمودار مدل دوبعدی تاثیر چگالی بر عیار روی



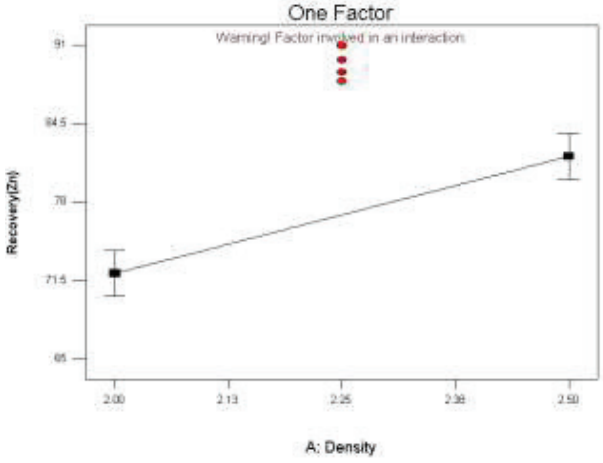
شکل ۱۱: نمودار مدل تاثیر شیب بر عیار روی

جدول ۱۵: جدول آنوا به دست‌آمده برای تحلیل نتایج بازیابی روی

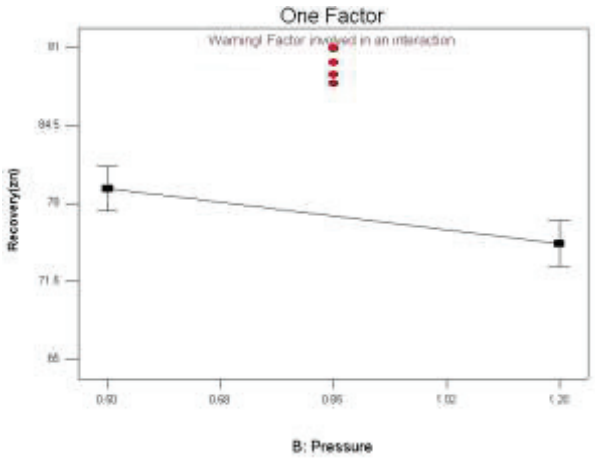
عامل	مقدار F	مقدار P	میانگین مربعات
A	۳۱٫۹۴	۰/۰۰۱۳	۱۸۷/۷۰
B	۷٫۲۱	۰/۰۳۶۳	۴۲/۳۷
AC	۱۹٫۶۲	۰/۰۰۴۴	۱۱۵/۲۹
BC	۱۳٫۲۶	۰/۰۱۰۸	۷۷/۹۴
مدل	۱۸/۰۱	۰/۰۰۱۷	۴۲۳/۲۹
L.O.F	۶/۲۰	۰/۰۸۴۱	۳۰/۳۶
اثر انحنا	۶۹/۹۷	۰/۰۰۰۲	۴۱۱/۱۰

در شکل ۱۲ نمودار مدل دوبعدی تأثیر چگالی بر بازیابی روی دیده می‌شود.

در این نمودار با افزایش چگالی میزان بازیابی روی افزایش می‌یابد. در این نمودار در چگالی ۲٫۵ کیلوگرم بر مترمکعب بیشترین بازیابی روی یعنی ۸۱٫۸ درصد به دست می‌آید. با مقایسه جدول آنوا به دست آمده با جدول ۲۴-۴ دیده می‌شود که عامل فشار به تنهایی و اندرکنش چگالی و شیب و اندرکنش فشار و شیب بر بازیابی سرب و روی تاثیرگذار است و این موضوع تا حدودی یکسان بودن رفتار سرب و روی در سیکلون را نشان می‌دهد. این موضوع در عیار سرب و روی نیز تا حدودی دیده شد. در شکل ۱۳ تاثیر فشار بر بازیابی روی دیده می‌شود.



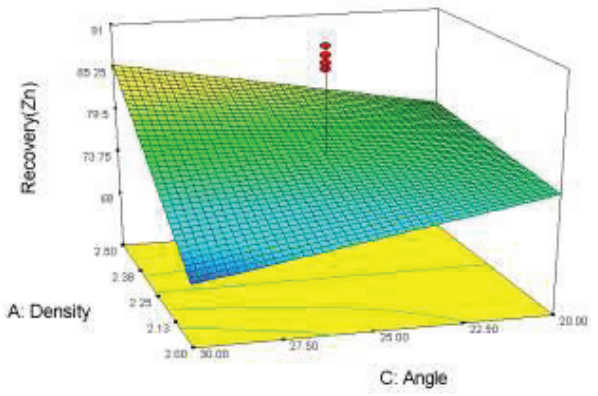
شکل ۱۲: نمودار مدل دوبعدی تأثیر چگالی بر بازیابی روی



شکل ۱۳: نمودار مدل دوبعدی تاثیر فشار بر بازیابی روی

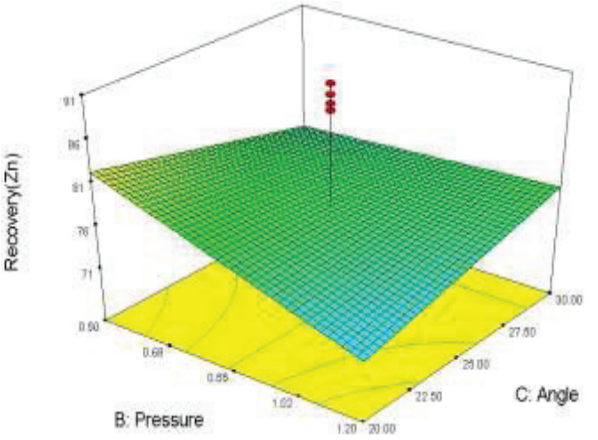
در این شکل بازیابی روی برخلاف سرب در فشار ۰/۵ بیشترین مقدار را دارد. این موضوع می‌تواند ناشی از اختلاف چگالی کانی‌های سرب و روی و یا ناشی از اختلاف مقادیر هر یک در خوراک ورودی به سیکلون واسطه سنگین باشد.

در ادامه در شکل ۱۴ نمودار مدل سه‌بعدی تاثیر اندرکنش شیب و چگالی بر بازیابی روی دیده می‌شود؛ بنابراین در چگالی ۲/۵ و شیب ۳۰ میزان بازیابی روی به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۱۴: نمودار مدل سه‌بعدی تاثیر اندرکنش چگالی و شیب بر بازیابی روی

در شکل ۱۵ تاثیر فشار و شیب بر بازیابی روی دیده می‌شود. در این شکل بازیابی روی در شیب ۲۰ و فشار ۰/۵ بیشترین مقدار بازیابی روی به دست می‌آید.



شکل ۱۵: نمودار مدل سه‌بعدی تاثیر اندرکنش فشار و شیب بر بازیابی روی

۳-۵-۵- بهینه‌سازی نتایج عیار و بازیابی سرب و روی

در پایان کار بهینه‌سازی پاسخ‌ها انجام شد. در نرم‌افزار سه عامل چگالی، فشار و شیب در دامنه خود و چهار پاسخ عیار سرب، بازیابی سرب، عیار روی و بازیابی روی بیشینه تعریف شد. هدف این بخش ماکزیمم کردن چهار پاسخ با توجه به عوامل بهینه است. در آخر عوامل به‌گونه‌ای که عیار و بازیابی سرب و روی بیشترین مقدار باشد. مقدار مطلوبیت ۰/۵۵۱ به دست آمد.

بر طبق جدول اگر چگالی سیکلون واسطه سنگین ۲ کیلوگرم بر مترمکعب، فشار ۰/۵ بار و شیب آن ۲۳/۸۷ درجه باشد، بیشترین عیار و بازیابی برای سیکلون واسطه سنگین به دست می‌آید، به‌گونه‌ای که عیار سرب ۰/۸۱، بازیابی سرب ۷۶/۳۸، عیار روی ۴/۴۰ و بازیابی روی ۷۵/۹۸ می‌شود.

پس از این نتایج یک آزمایش تاییدیه با عوامل بهینه یاد شده انجام شد. در این آزمایش برای سرب عیار ۰/۷۵ درصد و بازیابی ۷۳ درصد و برای روی عیار ۴/۱ و بازیابی ۷۴/۷۵ درصد به دست آمد که این مقادیر به دلیل خطاهای آزمایش و عیارسنجی از مقادیر ارایه‌شده با نرم‌افزار کمتر به دست آمد. این آزمایش‌ها مجدد تکرار و مشاهده شد که این اختلافات معنادار است.

جدول ۱۶: سطوح بهینه عوامل

عوامل	A	B	C	عیار سرب	بازیابی سرب	عیار روی	بازیابی روی
مقادیر	۲	۰/۵	۲۳/۸۷	۰/۸۱	۷۶/۳۸	۴/۴	۷۵/۹۸

۴- نتیجه‌گیری

۱- با توجه به آنالیز XRF مشخص شد که خوراک کارخانه به ترتیب دارای ۱/۸۸۳ و ۳/۳۶۲ درصد سرب و روی است و حدود ۶۴ درصد از خوراک را سیلیس تشکیل می‌دهد.

۲- با توجه نتایج آنالیز XRD مشخص شد که گالن و اسفالریت به عنوان کانی‌های اصلی و سیلیس، کلسیت و دولومیت به عنوان کانی‌های باطله در خوراک موجودند.

۳- پس از طبقه‌بندی نمونه‌های محصول سنگ‌شکن مخروطی، خوراک، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه سنگین d_{80} هر یک از نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۶۸۶۰، ۶۶۰۰، ۷۸۲۰، ۶۲۲۰ به دست آمد.

۴- پس از عیارسنجی طبقات سرندی نمونه‌های محصول سنگ‌شکن مخروطی، خوراک، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه سنگین مشخص شد که ذرات درشت(۹۵۲۶+) در خوراک توزیع سرب و روی کمی دارند. همچنین حدود ۱۲ درصد از سرب و روی در ابعاد زیر ۱ میلی‌متر است که وارد باطله می‌شود.

۵- با توجه به آزمایش‌های دانه‌بندی و با توجه به عیارسنجی طبقات نمونه‌های خوراک، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه سنگین کارخانه بهترین محدوده دانه‌بندی برای سیکلون واسطه سنگین ۱ تا ۶٫۳۵ میلی‌متر به عنوان یک نوآوری صنعتی در این تحقیق به دست آمد. در حالی‌که این دانه‌بندی در کارخانه ۱ تا ۱۲ میلی‌متر است.

۶- با توجه به طراحی آزمایش‌های عوامل دیگر سیکلون واسطه سنگین مانند چگالی واسطه، فشار ورودی و شیب، شرایط بهینه هر یک از عوامل یاد شده به ترتیب ۲ کیلوگرم بر مترمکعب، فشار ۰٫۵ بار و شیب ۲۳٫۸۷ درجه به دست آمد.

۷- با اعمال شرایط بهینه به دست آمده در سیکلون واسطه سنگین آزمایشگاهی بیشترین عیار و بازیابی سرب به ترتیب ۰٫۸۱ و ۷۶٫۳۸ درصد و بیشترین عیار و بازیابی روی ۴٫۴۰ و ۷۵٫۹۸ درصد به دست آمد.

۵- مراجع

[1] Magwai, M. K., and Bosman, J. (2008). *"The effect of cyclone geometry and operating conditions on spigot capacity of dense medium cyclones"*. International Journal of Mineral Processing, 86: 94-103.

[۲] نعمت اللهی، ح.؛ ۱۳۸۷؛ **"کانه‌آرایی"**. انتشارات دانشگاه تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

[۳] حاجتی، ع.؛ دهقانی، علی.؛ صامعی برزکی ج.؛ ۱۳۸۹؛ **"پرعیارسازی اولیه خوراک مدار فلوتاسیون سرب و روی لکان به وسیله سیکلون واسطه سنگین"**. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره پنجم، شماره ۹، ص ۷۸-۶۹.

[4] Amini, S. H., Honaker, R., and Noble, A. (2016). *"Performance evaluation of a dense-medium cyclone using alternative silica-based media"*. Powder Technology, 297: 392-400, .

[5] Sripriya, R., Banerjee, P., Rao, P., Dutta, A., and Rao, M. (2001). *"Critical evaluation of factors affecting the operation of dense medium cyclones treating medium coking coals"*. International journal of mineral processing, 63: 191-206, .

[6] Chen, J., Chu, K., Zou, R., Yu, A., Vince, A., and Barnett, G. (2017). *"Systematic study of the effect of particle density distribution on the flow and performance of a dense medium cyclone"*. Powder Technology, 314: 510-523.

[7] Chen, J., Chu, K., Zou, R., Yu, A., Vince, A., Barnett, G. (2016). *"Systematic study of effect of particle size distribution in a dense medium cyclone by Johnson's S B function"*. Minerals Engineering, 91: 16-33.

[8] Yuling, W., Yuemin, Z., and Jianguo, Y. (2011). *"Density distribution in a heavy-medium cyclone"*. Mining Science and Technology, 21: 175-179.

۱ Scrubber

۲ Curvature