

## چکیده

آسیاهای گلوله‌ای به طور گسترده‌ای در آسیا کردن مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آسیاکنی با این نوع آسیا بسیار هزینه بر است، بنابراین بهینه سازی این آسیاها ضروری است. شبیه سازی می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب در مطالعه عملکرد مدارهای آسیاکنی به منظور ارزیابی طرح‌های مختلف و شناسایی شرایط بهینه عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد.

مدار فرآوری سه چاهون از آسیای گلوله‌ای برای خردکردن کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی اولیه تا ابعاد کوچکتر از ۸۰ میکرون استفاده می‌کند. به علت تغییرات بار ورودی، آسیای فوق‌الذکر قادر به تامین ابعاد محصول مورد نیاز نبوده است. در تحقیق حاضر عملکرد این مدار مطالعه شده است. در این بررسی ضمن مرور داده‌های کارخانه، با انجام تغییر پارامترهای عملیاتی در مدار، عملکرد آسیای گلوله‌ای و هیدروسیکلون بررسی شده است.

مشاهده گردید که با افزایش خوراک بار ورودی تا ۳۰۰ تن بر ساعت، ابعاد سرریز هیدروسیکلون کاهش پیدا کرده است. همین روند برای کاهش درصد جامد خوراک ورودی به هیدروسیکلون نیز مشاهده شد. از آنجا که تغییر بعضی از پارامترها در مقیاس صنعتی امکان پذیر نبود، از روش شبیه سازی برای پیش بینی تاثیر این پارامترها بر عملکرد مدار آسیا استفاده شد. به این منظور از جریان‌های مختلف مدار نمونه گیری و آزمایش‌های خردایش در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. سپس با استفاده از نرم افزار JKSimMet مدار آسیای گلوله‌ای شبیه سازی شد. نتایج شبیه سازی همخوانی خوبی برای توزیع دانه بندی و درصد جامد جریان‌های مختلف نشان داد.

نتایج این شبیه سازی نشان داد که با انجام تغییراتی در پارامترهای مدار، امکان بهبود کارایی آن وجود دارد. مثلاً با قرار دادن هیدروسیکلون در ابتدای مدار نسبت خردایش آسیا از ۱/۸ به ۳/۴۴ افزایش می‌یابد و محصول نهایی مدار (سرریز سیکلون) به ۹۱ میکرون کاهش می‌یابد. همچنین دبی ورودی به آسیا از ۳۷۰ تن بر ساعت به ۲۲۵/۵ تن بر ساعت تغییر می‌کند. یعنی با تغییر در مدار امکان افزایش ظرفیت آسیا وجود دارد.

کلمات کلیدی: آسیای گلوله‌ای، هیدروسیکلون، تابع شکست و انتخاب، مدل سازی و شبیه

سازی، نرم افزار JKSimMet.

۱- فصل اول: مجتمع سنگ آهن چغارت

۳	۱-۱- مقدمه.....
۳	۲-۱- اطلاعات جغرافیایی معدن سه‌چاهون.....
۳	۳-۱- تاریخچه اکتشافات در سه‌چاهون.....
۴	۴-۱- زمین شناسی منطقه.....
۴	۵-۱- ذخیره قابل استخراج.....
۴	۶-۱- کارخانه فرآوری خط سه‌چاهون.....
۵	۷-۱- خط تولید سه‌چاهون.....

۲- فصل دوم: مدل‌سازی آسیای گلوله‌ای و هیدروسیکلون

۱۳	۱-۲- مقدمه.....
۱۳	۲-۲- آسیاهای گردان.....
۱۴	۳-۲- آسیای گلوله‌ای.....
۱۶	۴-۲- انواع آسیاهای گلوله‌ای.....
۱۶	۵-۲- مشخصات اصلی و عمده آسیای گلوله‌ای.....
۱۷	۲-۵-۱- اندازه‌های خوراک و محصول.....
۱۷	۲-۵-۲- پرشدگی آسیا از گلوله.....
۱۷	۲-۵-۳- اندازه و شکل گلوله.....
۱۹	۲-۵-۴- سرعت بحرانی.....
۲۰	۲-۵-۵- سیستم جعبه دنده.....
۲۰	۲-۵-۶- نسبت طول به قطر.....
۲۰	۲-۵-۷- سیستم‌های آستر.....
۲۱	۲-۵-۸- توان آسیای گلوله‌ای.....
۲۳	۲-۶- کلیات شبیه‌سازی مدارهای خردایش.....
۲۴	۲-۶-۱- تعریف شبیه‌سازی مدارهای خردایش.....
۲۴	۲-۶-۲- اهداف شبیه‌سازی مدارهای آسیاکنی:.....
۲۷	۲-۶-۳- مدل‌های ریاضی در شبیه‌سازی مدار.....
۲۸	۲-۶-۴- مدل ماتریسی.....
۳۲	۲-۶-۵- معادله ریاضی سینتیکی.....
۳۴	۲-۷- تابع ظهور.....
۳۵	۲-۷-۱- تابع ظهور JKMRC.....
۳۸	۲-۸- تئوری تابع شکست و تابع انتخاب در مباحث خردایش.....
۳۸	۲-۸-۱- تابع شکست.....

۴۶	..... ۲-۸-۲- تابع انتخاب
۴۹	..... ۲-۹- کاربرد توابع شکست و انتخاب
۴۹	..... ۲-۱۰- مدل سازی هیدروسیکلون
۵۰	..... ۲-۱۰-۱- اصول اساسی کار هیدروسیکلون
۵۲	..... ۲-۱۰-۲- مدل های تجربی کارآیی هیدروسیکلون ها

### ۳- فصل سوم: نمونه برداری و کارهای آزمایشگاهی انجام شده

۶۱	..... ۳-۱- مقدمه
۶۲	..... ۳-۲- نمونه گیری از قسمت های مختلف مدار آسیای گلوله ای سه چاهون
۶۳	..... ۳-۳- نمونه گیری از شاخه های مختلف هیدروسیکلون به منظور محاسبه انحراف معیار درصد جامد جریان ها
۶۵	..... ۳-۴- نمونه گیری از مدار برای تعیین کارآیی آسیا و هیدروسیکلون
۶۵	..... ۳-۴-۱- عملکرد فعلی آسیای گلوله ای سه چاهون
۶۷	..... ۳-۴-۲- عملکرد هیدروسیکلون سه چاهون
۷۴	..... ۳-۵- قابلیت خردایش (اندیس کار باند) خوراک آسیای گلوله ای سه چاهون
۷۵	..... ۳-۵-۱- اندیس کار آزمایشگاهی
۷۷	..... ۳-۵-۲- اندیس کار عملیاتی
۸۰	..... ۳-۶- آزمایش های انجام شده برای تعیین تابع شکست خوراک آسیای گلوله ای سه چاهون
۸۰	..... ۳-۶-۱- مواد و تجهیزات
۹۰	..... ۳-۷- تعیین تابع انتخاب آزمایشگاهی خوراک آسیای گلوله ای سه چاهون
۹۲	..... ۳-۸- تعیین تابع انتخاب صنعتی خوراک آسیای گلوله ای سه چاهون با نرم افزار NGOTC
۹۵	..... ۳-۹- تعیین ضرایب کالیبراسیون مدل های پلیت و ناگسوارا راثو
۱۰۵	..... ۳-۱۰- محاسبه توزیع زمان ماند مواد در آسیای گلوله ای سه چاهون
۱۰۶	..... ۳-۱۱- شبیه سازی مدار فرآوری سه چاهون با نرم افزار BMCS
۱۰۶	..... ۳-۱۱-۱- معرفی نرم افزار BMCS
۱۰۶	..... ۳-۱۱-۲- پارامترهای مورد نیاز در نرم افزار BMCS و نتایج شبیه سازی

### ۴- فصل چهارم: بررسی نتایج تغییر پارامترهای عملیاتی مدار فرآوری سه چاهون

۱۱۵	..... ۴-۱- مقدمه
۱۱۵	..... ۴-۲- تغییر خوراک تازه ورودی به آسیای خود شکن (خوراک تازه)
۱۱۹	..... ۴-۳- تغییر آب اضافه شده به جداکننده مغناطیسی ثانویه
۱۲۳	..... ۴-۴- تغییر در شیرهای خوراک ورودی به شاخه هیدروسیکلون
۱۲۷	..... ۴-۵- حذف بار در گردش آسیای خود شکن و تأثیر آن بر مدار

### ۵- فصل پنجم: شبیه سازی مدار آسیای گلوله ای سه چاهون با استفاده از نرم افزار JKSimMet

۱۳۱	..... ۵-۱- مقدمه
۱۳۳	..... ۵-۲- ویژگی های اصلی نرم افزار JKSimMet
۱۳۳	..... ۵-۲-۱- محدودیت ها
۱۳۴	..... ۵-۲-۲- اجزاء

۱۳۴	.....JKSimMet	۳-۲-۵- چگونگی کار کردن
۱۴۰	.....JKSimMet	۳-۳- شبیه سازی مدار بسته آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون با نرم افزار
۱۴۱	.....	۱-۳-۵- مدل‌های ریاضی
۱۴۳	.....	۲-۳-۵- موازنه جرم
۱۴۵	.....	۳-۳-۵- برازش مدل
۱۴۵	.....	۴-۳-۵- شبیه سازی
۱۵۰	.....JKSimMet	۴-۵- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد مدار خردایش به کمک شبیه ساز
۱۵۰	.....	۱-۴-۵- شبیه سازی ۱- کاهش قطر سرریز سیکلون به منظور دستیابی به محصول ریزتر
۱۵۲	.....	۲-۴-۵- شبیه سازی ۲- افزایش قطر ته ریز هیدروسیکلون به منظور دستیابی به محصول ریزتر
۱۵۳	.....	۳-۴-۵- شبیه سازی ۳- بررسی تأثیر تغییر بزرگ‌ترین قطر گلوله‌های شارژ شده به آسیای گلوله‌ای
۱۵۴	.....	۴-۴-۵- شبیه سازی ۴- افزایش درجه انباشتگی آسیای گلوله‌ای به منظور دستیابی به محصول ریزتر
۱۵۵	.....	۵-۴-۵- شبیه سازی ۵- جایگزینی سیکلون با قطر کمتر به منظور دستیابی به محصول ریزتر
۱۵۷	.....	۶-۴-۵- شبیه سازی ۶- تأثیرات تغییرات کلی
۱۵۸	.....	۷-۴-۵- بررسی پارامترهای طراحی بهینه هیدروسیکلون جهت دست یافتن به محصول مورد نظر
۱۶۰	.....	۵-۵- بررسی تأثیر خارج کردن بار در گردش آسیای خودشکن از مدار سه‌چاهون
۱۶۳	.....	۶-۵- بررسی تأثیر تغییر فلوشیت مدار آسیای گلوله‌ای

#### ۶- فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۶۹	.....	۱-۶- نتیجه گیری
۱۶۹	.....	۱-۱-۶- نتایج بررسی عملکرد مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون
۱۷۰	.....	۲-۱-۶- نتایج تغییرات عملی ایجاد شده در مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون
۱۷۱	.....	۳-۱-۶- نتایج شبیه سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون
۱۷۴	.....	۲-۶- پیشنهادها

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱- مشخصات طراحی مدار بسته آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون	۷
جدول ۲-۱- مشخصات هندسی هیدروسیکلون سه‌چاهون	۸
جدول ۳-۱- مشخصات جداکننده‌های مغناطیسی اولیه	۸
جدول ۴-۱- مشخصات جریان مربوط به هر یک از شاخه‌های خط تولید سه‌چاهون در طراحی اولیه انجام گرفته	۹
جدول ۱-۲- اندازه گلوله‌های معمول	۱۸
جدول ۲-۲- توزیع ابعادی بار اولیه و محصول از یک فرآیند کاهش ابعاد	۲۹
جدول ۳-۲- موازنه جرمی در یک فرآیند کاهش ابعاد	۳۰
جدول ۴-۲- محصول حاصل از فرآیند کاهش ابعاد بر حسب بار اولیه	۳۱
جدول ۵-۲- چگونگی تشکیل معادله عمومی ماتریس شکست	۳۲
جدول ۱-۳- نمونه گیرهای نصب شده در مدار خط تولید سه‌چاهون	۶۲
جدول ۲-۳- درصد جامد و انحراف معیار اندازه‌گیری شده برای جریان‌های اطراف سیکلون	۶۴
جدول ۳-۳- دانه بندی جریان‌های مختلف مدار بسته آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون در وضعیت فعلی کارخانه	۶۷
جدول ۴-۳- متوسط درصد جامد و رقت جریان‌های اطراف هیدروسیکلون S1	۶۹
جدول ۵-۳- تعیین ضریب توزیع هیدروسیکلون سه‌چاهون در وضعیت فعلی کارخانه برای نمونه S1	۷۲
جدول ۶-۳- تغییرات $d_{50}$ نسبت به توزیع دانه بندی	۷۴
جدول ۷-۳- مشخصات نمونه آماده شده برای آزمایش استاندارد اندیس کار باند	۷۶
جدول ۸-۳- اندیس کار بدست آمده از روش استاندارد باند	۷۷
جدول ۹-۳- اندیس کار عملیاتی محاسبه شده برای نمونه گیری S3	۷۹
جدول ۱۰-۳- ترکیب گلوله‌ها در آسیای استاندارد باند	۸۲
جدول ۱۱-۳- ترکیب گلوله‌ها در آسیای آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش تابع شکست	۸۲
جدول ۱۲-۳- تابع شکست غیر تجمعی خوراک خط سه‌چاهون به روش بروبه توسط نرم افزار BFDS	۸۶
جدول ۱۳-۳- تابع شکست غیر تجمعی خوراک خط سه‌چاهون به روش H&F توسط نرم افزار BFDS	۸۷
جدول ۱۴-۳- تابع شکست غیر تجمعی خوراک خط سه‌چاهون به روش H&F اصلاح شده با نرم افزار BFDS	۸۸
جدول ۱۵-۳- تابع انتخاب آزمایشگاهی محاسبه شده توسط نرم افزار BFDS برای خوراک آسیای گلوله‌ای	۹۱
جدول ۱۶-۳- تابع انتخاب صنعتی خوراک آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون محاسبه شده با نرم افزار NGOTC	۹۳
جدول ۱۷-۳- متوسط درصد جامد و رقت جریان‌های اطراف هیدروسیکلون در نمونه‌گیری S4	۹۷
جدول ۱۸-۳- تعیین ضریب توزیع هیدروسیکلون سه‌چاهون برای نمونه‌گیری S4	۹۹
جدول ۱۹-۳- مشخصات (پارامترهای طراحی) هیدروسیکلون سه‌چاهون	۱۰۱
جدول ۲۰-۳- مقادیر تجربی متغیرهای عملیاتی برای هیدروسیکلون سه‌چاهون در نمونه‌گیری S4	۱۰۱
جدول ۲۱-۳- متغیرهای وابسته محاسبه شده از روابط پلیت برای هیدروسیکلون سه‌چاهون برای نمونه S4	۱۰۲
جدول ۲۲-۳- ضرایب کالیبراسیون مدل پلیت برای نمونه S4	۱۰۲
جدول ۲۳-۳- متغیرهای وابسته محاسبه شده از روابط ناگسوارا راثو برای هیدروسیکلون برای نمونه‌گیری S4	۱۰۲
جدول ۲۴-۳- ضرایب کالیبراسیون مدل ناگسوارا راثو برای نمونه‌گیری S4	۱۰۳
جدول ۲۵-۳- مقادیر تجربی متغیرهای عملیاتی برای هیدروسیکلون سه‌چاهون در نمونه‌گیری S1	۱۰۳
جدول ۲۶-۳- متغیرهای وابسته محاسبه شده از روابط پلیت برای هیدروسیکلون سه‌چاهون برای نمونه S1	۱۰۳

- جدول ۳-۲۷- ضرایب کالیبراسیون مدل پلیت برای نمونه S1..... ۱۰۴
- جدول ۳-۲۸- مقادیر تجربی متغیرهای عملیاتی برای هیدروسیکلون سه‌چاهون در نمونه‌گیری S3..... ۱۰۴
- جدول ۳-۲۹- متغیرهای وابسته محاسبه شده از روابط پلیت برای هیدروسیکلون سه‌چاهون برای نمونه S3..... ۱۰۴
- جدول ۳-۳۰- ضرایب کالیبراسیون مدل پلیت برای نمونه S3..... ۱۰۵
- جدول ۳-۳۱- پارامترهای توزیع زمان ماند مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون (محاسبه شده توسط RTDWEN ..... ۱۰۵
- جدول ۳-۳۲- مشخصات جریان‌های شبیه سازی شده مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون در نرم افزار BMCS..... ۱۰۷
- جدول ۳-۳۳- دانه بندی خوراک و محصول شبیه سازی شده آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون در نرم افزار BMCS..... ۱۰۸
- جدول ۳-۳۴- توزیع ابعادی جریان‌های اطراف هیدروسیکلون در شبیه سازی مدار توسط نرم افزار BMCS..... ۱۰۹
- جدول ۳-۳۵- پارامترهای شبیه سازی شده مدل پلیت در نرم افزار BMCS..... ۱۱۱
- جدول ۴-۱- اطلاعات جریان‌های مختلف مدار در تغییر خوراک ورودی به آسیای خودشکن..... ۱۱۶
- جدول ۴-۲- اطلاعات جریان‌های مختلف مدار در تغییر درصد جامد خوراک ورودی ..... ۱۲۰
- جدول ۴-۳- اطلاعات جریان‌های مختلف مدار در تغییر دبی خوراک ورودی سیکلون ..... ۱۲۴
- جدول ۵-۱- نتایج موازنه جرم مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون توسط نرم افزار JKSimMet ..... ۱۴۵
- جدول ۵-۲- نتایج برازش مدل مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون توسط نرم افزار JKSimMet ..... ۱۴۵
- جدول ۵-۳- مشخصات جریان‌های شبیه سازی شده مدار آسیای گلوله‌ای در نرم افزار JKSimMet ..... ۱۴۶
- جدول ۵-۴- مشخصات جریان‌های تجربی و شبیه سازی شده مدار آسیای گلوله‌ای در نرم افزار JKSimMet ..... ۱۴۹
- جدول ۵-۵- نتایج شبیه سازی با قطر سرریز ۲۳ سانتی متر ..... ۱۵۱
- جدول ۵-۶- نتایج شبیه سازی با قطر سرریز ۲۰ سانتی متر..... ۱۵۱
- جدول ۵-۷- نتایج شبیه سازی با قطر سرریز ۱۵ سانتی متر ..... ۱۵۲
- جدول ۵-۸- نتایج شبیه سازی برای مقادیر مختلف قطر ته ریز هیدروسیکلون ..... ۱۵۳
- جدول ۵-۹- نتایج شبیه سازی برای مقادیر مختلف بزرگ‌ترین قطر گلوله شارژ شده..... ۱۵۳
- جدول ۵-۱۰- نتایج شبیه سازی مدار در مقادیر مختلف از درجه انباشتگی گلوله..... ۱۵۴
- جدول ۵-۱۱- نتایج شبیه سازی با قطر سیکلون ۶۰ سانتی متر..... ۱۵۵
- جدول ۵-۱۲- نتایج شبیه سازی با قطر سیکلون ۵۵ سانتی متر..... ۱۵۶
- جدول ۵-۱۳- نتایج شبیه سازی با قطر سیکلون ۵۰ سانتی متر..... ۱۵۶
- جدول ۵-۱۴- نتایج شبیه سازی با قطر سیکلون ۴۶ سانتی متر..... ۱۵۷
- جدول ۵-۱۵- نتایج شبیه سازی برای تغییرات کلی ایجاد شده در پارامترهای طراحی مدار ..... ۱۵۸
- جدول ۵-۱۶- پارامترهای طراحی بهینه هیدروسیکلون برای دستیابی به محصول مورد نظر..... ۱۵۹
- جدول ۵-۱۷- مقادیر برازش مدل برای پارامترهای آسیا و هیدروسیکلون..... ۱۵۹
- جدول ۵-۱۸- نتایج شبیه سازی برای تأثیر تغییر همزمان پارامترهای طراحی هیدروسیکلون..... ۱۵۹
- جدول ۵-۱۹- نتایج موازنه جرم مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون توسط نرم افزار JKSimMet برای نمونه S4..... ۱۶۱
- جدول ۵-۲۰- نتایج برازش مدل شبیه سازی مدار آسیای گلوله‌ای توسط نرم افزار JKSimMet برای نمونه S4 ..... ۱۶۲
- جدول ۵-۲۱- نتایج شبیه سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون توسط نرم افزار JKSimMet برای نمونه S4 ..... ۱۶۲
- جدول ۵-۲۲- مقادیر پارامترهای طراحی هیدروسیکلون مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون برای فلوشیت پیشنهادی..... ۱۶۴
- جدول ۵-۲۳- نتایج موازنه جرم مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون برای فلوشیت پیشنهادی..... ۱۶۴
- جدول ۵-۲۴- نتایج برازش مدل مدار سه‌چاهون توسط نرم افزار JKSimMet برای فلوشیت پیشنهادی..... ۱۶۵
- جدول ۵-۲۵- نتایج شبیه سازی مدار سه‌چاهون توسط نرم افزار JKSimMet برای فلوشیت پیشنهادی..... ۱۶۵

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- فلو شیت خط تولید سه‌چاهون کارخانه فرآوری چغارت.....	۷
شکل ۱-۲- تصویری از آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون.....	۱۵
شکل ۲-۲- گلوله‌هایی با قطر مختلف در آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون.....	۱۹
شکل ۳-۲- آسترهای لاستیکی آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون.....	۲۱
شکل ۴-۲- نمودارهای $t_{10}$ مقابل $t_N$ .....	۳۶
شکل ۵-۲- تصویری از دستگاه وزنه افتان.....	۳۷
شکل ۶-۲- نمودار لگاریتمی تابع توزیع شکست.....	۳۹
شکل ۷-۲- توزیع دانه بندی حاصل از شکست یک سنگ در اثر فقط یک ضربه.....	۴۱
شکل ۸-۲- تابع شکست قابل نرمال شدن.....	۴۵
شکل ۹-۲- تابع شکست غیر قابل نرمال شدن.....	۴۵
شکل ۱۰-۲- نمودار محاسبه تابع انتخاب.....	۴۷
شکل ۱۱-۲- نمایی از قسمت‌های مختلف سیکلون و نحوه کار آن.....	۵۱
شکل ۱-۳- نمونه گیر نصب شده برای خوراک هیدروسیکلون.....	۶۳
شکل ۲-۳- نقاط نمونه برداری از مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون.....	۶۴
شکل ۳-۳- دانه بندی جریان‌های مختلف مدار در وضعیت فعلی کارخانه.....	۶۶
شکل ۴-۳- توزیع‌های ابعادی خوراک، سرریز و ته ریز هیدرو سیکلون در نمونه گیری S1.....	۶۸
شکل ۵-۳- منحنی‌های توزیع هیدروسیکلون سه‌چاهون برای نمونه S1.....	۷۲
شکل ۶-۳- تغییرات اندیس کار عملیاتی در طی نمونه برداری S3.....	۸۰
شکل ۷-۳- تابع شکست غیر تجمعی محاسبه شده به روش بروبه.....	۸۹
شکل ۸-۳- تابع شکست غیر تجمعی محاسبه شده به روش H&F.....	۸۹
شکل ۹-۳- تابع شکست غیر تجمعی محاسبه شده به روش H&F اصلاح شده.....	۹۰
شکل ۱۰-۳- تابع انتخاب آزمایشگاهی خوراک آسیای گلوله‌ای برای فراکسیون‌های مختلف ابعادی.....	۹۲
شکل ۱۱-۳- نمودار تابع انتخاب صنعتی محاسبه شده خوراک آسیای گلوله‌ای با استفاده از نرم افزار NGOTC.....	۹۵
شکل ۱۲-۳- دستگاه دانسیته سنج پالپ مارسی مورد استفاده در کارخانه فرآوری چغارت.....	۹۶
شکل ۱۳-۳- توزیع‌های ابعادی خوراک، سرریز و ته ریز هیدرو سیکلون برای نمونه S4.....	۹۸
شکل ۱۴-۳- منحنی‌های توزیع هیدروسیکلون سه‌چاهون برای نمونه S4.....	۱۰۰
شکل ۱۵-۳- مقایسه بین توزیع دانه بندی خوراک واقعی و شبیه سازی شده آسیا در نرم افزار BMCS.....	۱۱۰
شکل ۱۶-۳- مقایسه بین توزیع دانه بندی محصول واقعی و شبیه سازی شده آسیا در نرم افزار BMCS.....	۱۱۰
شکل ۱۷-۳- مقایسه بین توزیع دانه بندی سرریز و ته ریز واقعی و شبیه سازی شده در نرم افزار BMCS.....	۱۱۱
شکل ۱-۴- تغییرات خوراک ورودی به آسیای گلوله‌ای و کنسانتره تولیدی نسبت به خوراک تازه ورودی به مدار.....	۱۱۷
شکل ۲-۴- تغییرات درصد جامد شاخه‌های مختلف مدار در مقادیر مختلف خوراک تازه ورودی.....	۱۱۸
شکل ۳-۴- رابطه تغییر $d_{80}$ محصول با مقادیر مختلف خوراک تازه ورودی.....	۱۱۸
شکل ۴-۴- نمودار توزیع دانه بندی سرریز سیکلون در ازای مقادیر مختلف خوراک تازه ورودی.....	۱۱۹
شکل ۵-۴- تغییرات درصد جامد شاخه‌های مختلف سیکلون در مقادیر مختلف آب اضافه شده به تانک مگنت.....	۱۲۱
شکل ۶-۴- تغییرات $d_{80}$ محصول سیکلون نسبت به درصد جامد خوراک سیکلون.....	۱۲۲



- شکل ۴-۷- تغییرات خوراک ورودی به مدار و کنسانتره تولیدی در نمونه تغییر درصد جامد خوراک سیکلون ..... ۱۲۲
- شکل ۴-۸- نمودار تغییرات d80 محصول با تناژ خشک ورودی به هیدروسیکلون ..... ۱۲۵
- شکل ۴-۹- تغییرات درصد جامد شاخه‌های مختلف سیکلون در مقادیر مختلف فشار پالپ ورودی به سیکلون ..... ۱۲۶
- شکل ۴-۱۰- تغییرات خوراک تازه ورودی و کنسانتره تولیدی در نمونه گیری مربوط به تغییر فشار ..... ۱۲۶
- شکل ۴-۱۱- دانه بندی خوراک ورودی به آسیای گلوله‌ای قبل و بعد از خارج کردن بار در گردش ..... ۱۲۷
- شکل ۵-۱- فلوشیت مدار و نتایج موازنه جرمی بدست آمده توسط JKSimMet ..... ۱۴۴
- شکل ۵-۲- توزیع دانه بندی خوراک تازه ورودی شبیه سازی شده آسیای گلوله‌ای ..... ۱۴۷
- شکل ۵-۳- مقایسه بین توزیع دانه بندی خوراک، سرریز و ته ریز شبیه سازی شده هیدروسیکلون در نرم افزار ..... ۱۴۷
- شکل ۵-۴- مقدار خطای کلی و اعتبار سنجی مدل برای جریان‌های اطراف هیدروسیکلون ..... ۱۴۸
- شکل ۵-۵- مقایسه کلی بین جریان‌های شبیه سازی شده توسط نرم افزار JKSimMet و مقادیر واقعی ..... ۱۴۹
- شکل ۵-۶- فلوشیت مدار و نتایج موازنه جرم بدست آمده توسط JKSimMet برای نمونه S4 ..... ۱۶۰
- شکل ۵-۷- فلوشیت پیشنهادی برای مدار بسته آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون ..... ۱۶۳
- شکل ۵-۸- توزیع دانه بندی جریان‌های مختلف هیدروسیکلون شبیه سازی شده توسط نرم افزار JKSimMet ..... ۱۶۶
- شکل ۵-۹- خطای کلی شبیه سازی جریان‌های مختلف سیکلون توسط نرم افزار برای فلوشیت پیشنهادی ..... ۱۶۶

فرآیندهای آسیاکنی نقش مهمی در مدارهای خردایش و طبقه بندی دارند. بهینه کردن این مدار منجر به بهبود عملیات از نظر فنی و اقتصادی می‌شود. آسیاهای گلوله‌ای معمولاً در مدار بسته با هیدروسیکلون کار می‌کنند. هر دو وسیله فوق به پارامترهای عملیاتی حساس هستند. تکنیک‌های شبیه سازی را می‌توان به عنوان یک ابزار مناسب در مطالعه عملکرد مدارهای آسیاکنی به کار برد. نرم افزار JKSimMet یک شبیه ساز متداول در خردایش است که در سال‌های اخیر به منظور طراحی و بهینه سازی مدارهای آسیاکنی مورد استفاده قرار گرفته است.

هدف این پروژه بررسی عملکرد فعلی مدار آسیاکنی سه چاهون و امکان بهینه سازی این مدار به منظور افزایش ظرفیت و کاهش ابعاد محصول نهایی است. در حال حاضر، اندازه خوراک تازه ورودی به آسیای گلوله‌ای ۲۴۰ میکرون در مقایسه با مقدار طراحی، ۴۶۰ میکرون، است. محصول نهایی مدار نسبت به طراحی (حدود ۸۰ میکرون) درشت تر (۸۸/۴ میکرون) می‌باشد. نسبت خردایش آسیا ۲/۷۱ است که به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقدار طراحی (۵/۵۷) است. در ادامه نحوه بررسی مدار، نتایج حاصل از مطالعات صنعتی، شبیه سازی مدار و پیشنهادهای ارائه شده به منظور بهینه سازی آن آمده است.

این گزارش در ۶ فصل تدوین شده است. در فصل اول کلیاتی از مجتمع سنگ آهن چغارت و مدار خردایش سه‌چاهون آمده است. تئوری‌های موجود در زمینه مدل‌سازی آسیا و هیدروسیکلون در فصل دوم آورده شده است. در فصل سوم ابتدا، نمونه برداری صنعتی و کارهای آزمایشگاهی انجام گرفته مورد بحث قرار گرفته است و در ادامه نتایج مربوط به مدل‌سازی هیدروسیکلون توسط روابط پلیت و ناگسوارا رانو و همچنین شبیه سازی آسیای گلوله‌ای توسط نرم افزار BMCS ارائه شده است. در فصل چهارم به بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون پرداخته شده است. کلیات نرم افزار شبیه ساز JKSimMet و نتایج شبیه سازی مدار سه چاهون، در شرایط طراحی و عملیاتی مختلف، در فصل پنجم آمده است. در فصل ششم، جمع بندی نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهادهای ارائه شده برای مطالعات بعدی آورده شده است.

# فصل اول

مجتمع سنگ آهن چغارت

## ۱-۱- مقدمه

معدن سنگ آهن چغارت در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق، ۱۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان یزد، ۷۵ کیلومتری جنوب غربی شهر بهاباد و در حاشیه کویر مرکزی ایران واقع شده است. معدن سه‌چاهون در ۴۷ کیلومتری شمال شرقی بافق و ۳۵ کیلومتری معدن چغارت قرار دارد. طرح توسعه مجتمع معدنی سنگ آهن چغارت در فاصله ۱۰ کیلومتری شهرستان بافق در مجاورت سنگ آهن چغارت واقع شده است. شهرستان بافق در مسیر راه آهن سراسری تهران- بندر عباس قرار گرفته و با انشعابی به کرمان متصل است که در آینده از طریق طبس به مشهد نیز متصل خواهد شد [۱].

## ۲-۱- اطلاعات جغرافیایی معدن سه‌چاهون

کانسار سه‌چاهون در شمال شرق معدن چغارت در طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۳ دقیقه شمالی قرار گرفته است. ارتفاع متوسط از سطح دریا ۱۶۵۰ متر است.

آب و هوای منطقه کویری و خشک بوده، دارای تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد است. به علت اختلاف ارتفاع معدن چغارت و کانسار سه‌چاهون، اختلاف قابل توجهی در درجه حرارت محدوده این کانسارها وجود دارد [۱].

## ۳-۱- تاریخچه اکتشافات در سه‌چاهون

عملیات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی در سال ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۰ منجر به کشف چند آنومالی از جمله آنومالی XI سه‌چاهون شد. طی قرار دادی بین شرکت ملی فولاد ایران و کارشناسان شوروی، گزارش اکتشاف تفصیلی کانسار سنگ آهن سه‌چاهون در ایران مرکزی ارائه گردید. اکتشاف تفصیلی کانسار سنگ آهن سه‌چاهون در سال ۱۹۷۲ توسط کارشناسان شوروی به اتمام رسید که

در نهایت گزارش شامل ۴ جلد در سال ۱۹۷۴ به طرف ایرانی داده شد. عملیات انجام شده شامل حفاری‌های اکتشافی و حفاری‌های پی جویی، نقشه برداری، عملیات سطحی و زیر مینی، نقشه برداری، زمین شناسی، نمونه برداری، تجزیه شیمیایی، مطالعات پترولوژی، عملیات چاه پیمایی، مینیومتری، گراوی متری، تعیین خاصیت فیزیکی سنگ‌ها و تهیه نقشه‌های توپوگرافی بوده است.

#### ۴-۱- زمین شناسی منطقه

کانسار سه‌چاهون در سازندهای پر کامبرین پسین ایران مرکزی قرار گرفته است. در بر گیرنده‌های این کانسار مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی، فیلیت، شیست‌های متبلور، گنیس و مرمر هستند که بنام سری مراد در فرهنگ چینه شناسی از آن یاد شده است. مجموعه سری مراد با دگرشیبی خفیف توسط طبقاتی متعلق به اینفرا کامبرین متشکل از گدازه، کربنات، شیست، فیلیت و کنگلومرا پوشانده شده که سن آن به اوایل پرکامبرین بر می‌گردد [۱].

#### ۵-۱- ذخیره قابل استخراج

ذخیره قابل استخراج توده جنوبی ۴۹/۶ میلیون تن با متوسط عیار ۳۹/۸٪ آهن ، ۰/۵۷٪ فسفر نسبت  $\frac{Fe}{FeO}$  برابر ۳/۰۸ ، میزان کل باطله برداری ۶۲/۲ میلیون تن و نسبت باطله برداری  $(\frac{W}{O})$  برابر ۱/۲۵ است [۲].

#### ۶-۱- کارخانه فرآوری خط سه‌چاهون

وجود منابع معدنی سنگ آهن کم عیار در معدن سه‌چاهون و اینکه نمی‌توان از این نوع سنگ مستقیماً در صنایع فولادسازی استفاده نمود، لزوم احداث کارخانه فرآوری با هدف تولید کنسانتره آهن را به وجود آورد. یکی از اهداف طرح توسعه چغارت، تولید ۱/۶ میلیون تن کنسانتره

آهن از معدن سنگ آهن سه‌چاهون جهت مصرف در صنایع فولادسازی است. طبق طراحی، با هدف تولید سالانه ۱/۶ میلیون تن کنسانتره آهن با عیار ۶۶ درصد، ۳/۴ میلیون تن سنگ آهن کم عیار از معدن سه‌چاهون استخراج و پس از خردایش در سنگ شکن فکی با دانه بندی کوچک‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر، توسط نوار نقاله‌ای به طول ۲۳۰ متر جهت بارگیری به انبار سنگ خرد شده منتقل می‌شود. سپس بر روی نوار نقاله هدایت شده و به سیلوه‌های بارگیری راه آهن منتقل می‌شود، در نهایت سنگ آهن توسط راه آهن بافق - مشهد به محل انبار در سایت چغارت منتقل می‌شود.

در حال حاضر این عمل توسط کامیون انجام می‌گیرد. ماده معدنی پس از تخلیه در ایستگاه چغارت توسط نوار نقاله جهت مخلوط شدن مواد، همگن سازی و ذخیره شده سپس به بخش انباشت بستر همگن ساز منتقل می‌شود. لازم به ذکر است که برای بالا بردن عیار خوراک خط سه‌چاهون، از ترکیب سنگ آهن چغارت و سه‌چاهون استفاده می‌گردد [۳].

## ۱-۷- خط تولید سه‌چاهون

سنگ آهن کم عیار استخراجی از معدن سه‌چاهون پس از خردایش در سنگ شکن فکی با دانه بندی کوچک‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر توسط کامیون به بخش همگن ساز منتقل می‌شود.

پس از تخلیه، کانسنگ توسط نوار نقاله به بخش انباشت و برداشت بستر کانه آرای انتقال و از بخش انباشت توسط دستگاه ریکلایمر<sup>۱</sup> و نوار نقاله به سیلوی ۲۰۰۰ تنی حمل و از طریق خوراک دهنده لرزان به آسیای خودشکن جهت آسیا شدن (که در مدار بسته با سرند لرزان با روزنه ۱ میلی‌متر کار می‌کند) وارد می‌شود. در نهایت مواد خروجی از آسیای خودشکن به همراه آب بر روی سرند لرزان منتقل می‌شود.

ته ریز سرند با آب و مواد برگشتی از نمونه گیر S224 که در شاخه خوراک ورودی به جداکننده‌های مغناطیسی اولیه نصب شده است، مخلوط و به چهار شاخه، سه شاخه به سه جداکننده مغناطیسی اولیه وارد می‌شود که به صورت موازی نصب شده‌اند و یک شاخه به نمونه

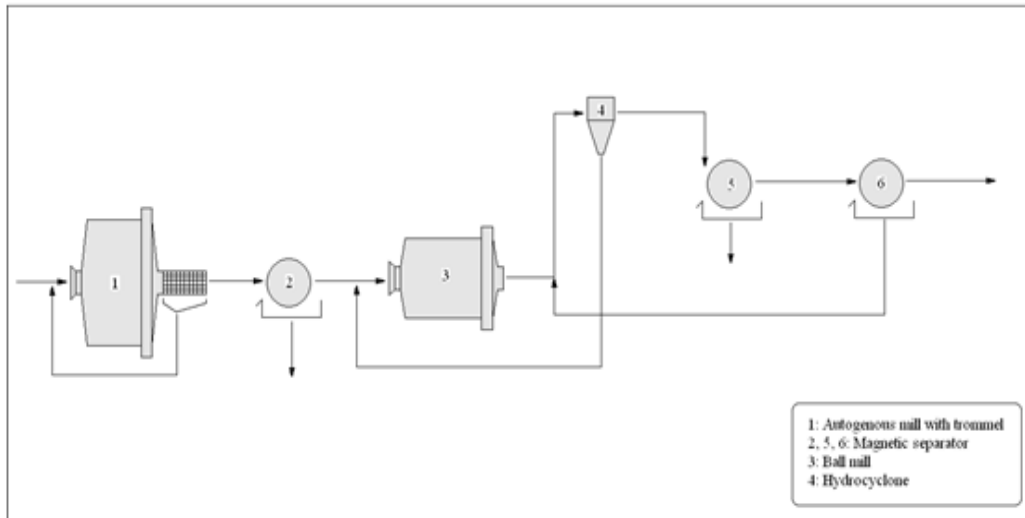
---

1. Reclaimer

گیر S224 وارد می‌شود. سپس محصول پر عیار شده جداکننده‌ها جهت خردایش بیشتر و رسیدن به درجه آزادی بیشتر، وارد آسیای گلوله‌ای می‌شود و باطله جداکننده‌ها توسط نمونه گیر S227B نمونه‌گیری شده و در نهایت پس از آگیری در تیکنر به سد باطله منتقل می‌شود.

محصول جداکننده مغناطیسی اولیه بعد از اینکه توسط نمونه گیر S227A نمونه‌گیری شد، به همراه آب و مواد برگشتی از ته ریز هیدروسیکلون (بار در گردش) به منظور رسیدن به دانه بندی و عیار مورد نظر وارد آسیای گلوله‌ای می‌شود. آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون که از نوع تخلیه سرریز است، دارای قطر داخلی ۴/۵ متر و طول ۶/۹ متر است. سرعت این آسیا ۱۵/۴۴ دور بر دقیقه است که ۷۵/۶٪ سرعت بحرانی آن است و با درجه انباشتگی ۳۵٪ کار می‌کند. این آسیا در مدار بسته با هیدروسیکلون کار می‌کند. خروجی آسیای گلوله‌ای به همراه باطله حاصل از جداکننده مغناطیسی ثانویه مرحله دوم، وارد هیدروسیکلون می‌شوند. سرریز هیدروسیکلون در سه شاخه، دو شاخه به صورت موازی وارد جداکننده مغناطیسی ثانویه مرحله اول و یک شاخه هم وارد نمونه گیر S245 می‌شود. باطله مرحله اول ضمن اینکه توسط نمونه گیر S248B نمونه‌گیری می‌شود، به تیکنر باطله انتقال می‌یابد [۴].

محصول حاصل از هر کدام از جداکننده‌های ثانویه مرحله اول به همراه آب، وارد جداکننده‌های مغناطیسی ثانویه مرحله دوم می‌شوند. باطله‌های این مرحله با هم مخلوط و به ورودی هیدروسیکلون منتقل می‌شوند. کنسانتره حاصل از جداکننده‌های مغناطیسی ثانویه مرحله دوم به بخش فیلتراسیون انتقال می‌یابد. کنسانتره آگیری شده توسط نوار نقاله به محوطه انباشت منتقل می‌شود. ظرفیت طراحی تولید کنسانتره خط سه‌چاهون برابر ۲۴۵ تن کنسانتره در ساعت با عیار ۶۶٪ آهن و ۹٪ رطوبت می‌باشد. فلوشیت ساده‌ای از خط تولید سه‌چاهون در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. مشخصات طراحی آسیا و هیدروسیکلون‌ها در جدول ۱-۱ و جدول ۲-۱ آورده شده است [۴].



شکل ۱-۱- فلوشیت خط تولید سه چاهون کارخانه فرآوری چغارت [۴]

جدول ۱-۱- مشخصات طراحی مدار بسته آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون [۴]

مشخصات آسیا	
تخلیه سرریزی تر	نوع آسیا
۴/۵ متر	قطر آسیا
۶/۹ متر	طول آسیا
۶ کیلو وات ساعت بر تن	انرژی خالص مصرفی
۳۰۰ تن بر ساعت	نرخ خوراک تازه ورودی به آسیا (خشک)
۴/۶۶ تن بر متر مکعب (متوسط)	وزن مخصوص کانه
۴۶۰ میکرون	ابعاد خوراک ( $F_{80}$ )
۸۰ میکرون	ابعاد محصول ( $P_{80}$ )
۱۵/۴۴ دور بر دقیقه ۷۵/۶٪ سرعت بحرانی	سرعت آسیا (ثابت)
۲۵۰۰ کیلو وات	قدرت اسمی موتور
۹۹۳ دور بر دقیقه (ثابت)	سرعت موتور
فولادی- لاستیکی	جنس آستر
برای کار ۳۵٪ ماکزیمم ۴۰٪	میزان شارژ گلوله



در ماکزیمم شارژ گلوله، ۱۷۵ تن ۵۰ میلی متر = ۰.۴۲٪ ۴۰ میلی متر = ۰.۴۲٪ ۳۰ میلی متر = ۰.۱۳٪ ۲۵ میلی متر = ۰.۳٪	واسطه خردایش
--	--------------

جدول ۱-۲- مشخصات هندسی هیدروسیکلون سه چاهون [۴]

قطر ورودی	۲۸/۲۲ سانتی متر
قطر سیکلون	۶۶/۰۴ سانتی متر
ارتفاع آزاد سرریز	۱۷۰ سانتی متر
قطر سرریز	۲۵/۴ سانتی متر
قطر ته ریز	۱۰/۱۶ سانتی متر
زاویه مخروط	۱۲ درجه
تعداد هیدروسیکلون در مدار موازی	۳

جدول ۱-۳- مشخصات جداکننده‌های مغناطیسی اولیه [۳]

نوع جداکننده	۲ استوانه‌ای
نوع مخزن	غیر هم جهت (با گردش استوانه‌ها)
ظرفیت طراحی	۱۸۳ t/h (۴۶۹ m <sup>3</sup> /h)
درصد جامد خوراک	۳۰٪ وزنی
دانسیته پالپ	۱۳۱۰ g/l
قطر استوانه	۱۲۰۰ mm
طول استوانه	۳۰۰۰ mm
سرعت	۱/۲ mm
تعداد قطب‌ها	۵
فاصله (گام) تا قطب	۲۸۵ mm
شدت میدان	۱۹۰۰ گوس در سطح استوانه

جدول ۴-۱- مشخصات جریان مربوط به هر یک از شاخه‌های مدار خط تولید سه‌چاهون در طراحی اولیه

انجام گرفته [۴]

آب اضافه شده (m <sup>3</sup> /h)	دبی پالپ (m <sup>3</sup> /h)	آب (m <sup>3</sup> /h)	گرم جامد در هر لیتر پالپ	درصد وزنی جامد	جامد خشک (t/h)	شاخه
۳۵۵	۷۶۸	۵۴۳	۱۰۶۰	۶۰	۸۱۴	خروجی آسیای خودشکن
	-	۱۰	-	۹۵	۱۸۶	رو سرندي
	۱۰۶۲	۸۸۸	۵۹۱	۴۱	۶۲۸	زیر سرندي
۵۷۶	۱۱۴۴	۹۶۲	۵۷۶	۴۱	۶۵۹	خوراک کل جداکننده مغناطیسی اولیه
	۵۴۶	۴۸۸	۳۸۳	۳۰	۲۰۹/۳	خوراک هر کدام از جداکننده مغناطیسی اولیه
	۸۲	۷۴	۳۸۳	۳۰	۳۱	نمونه گیر S224
	۱۹۲	۱۲۸	۱۵۶۳	۷۰	۳۰۰	محصول کل جداکننده مغناطیسی اولیه
	۱۴۵	۱۳۳۶	۲۲۶	۲۰	۳۲۸	باطله کل جداکننده مغناطیسی اولیه
	۱۴۵	۱۳۴	۲۲۶	۲۰	۳۳	نمونه گیر S227B
	۲۳۲	۱۶۶	۱۲۹۳	۶۴	۳۰۰	ته ریز سیکلون
۱۰۶	۵۳۰	۴۰۰	۱۱۳۲	۶۰	۶۰۰	ورودی آسیای گلوله‌ای
	۵۳۰	۴۰۰	۱۱۳۲	۶۰	۶۰۰	خروجی آسیای گلوله‌ای
	۴۴	۳۹	۳۹۲	۳۰	۷	نمونه گیر S245

ادامه جدول ۱-۴- مشخصات جریان مربوط به هر یک از شاخه‌های مدار خط تولید سه‌چاهون در طراحی اولیه انجام گرفته [۴]

	۱۰۹۸	۹۵۷	۵۸۲	۴۰	۶۳۹	ورودی هیدروسیکلون
	۵۲۴	۵۱۸	۴۲	۴	۲۲	باطله مرحله دوم جداکننده مغناطیسی ثانویه
	۸۶۶	۷۹۱	۳۹۲	۳۰	۳۳۹	سرریز هیدروسیکلون
	۴۱۱	۳۷۶	۳۹۲	۳۰	۱۶۱	خوراک هر یک از جداکننده‌های مرحله اول مغناطیسی ثانویه
۲۵۴/۵	۸۴.۵	۵۷	۱۵۸۰	۷۰	۱۳۳/۵	محصول هر یک از جداکننده‌های مرحله اول مغناطیسی ثانویه
	۳۲۶/۵	۳۱۹	۸۴	۸	۲۷/۵	باطله هر یک از جداکننده‌های مغناطیسی ثانویه مرحله اول
	۳۳۹	۳۱۱/۵	۳۹۴	۳۰	۱۳۳/۵	خوراک هر یک از جداکننده‌های مغناطیسی ثانویه مرحله دوم
	۷۷	۵۲/۵	۱۵۹۰	۷۰	۱۲۲/۵	محصول هر یک از جداکننده‌های مغناطیسی ثانویه مرحله دوم
	۲۶۲	۲۵۹	۴۲	۴	۱۱	باطله هر یک از جداکننده‌های مغناطیسی ثانویه مرحله دوم
	-	۲۵/۷	-	۹۰/۵	۲۴۵	کنسانتره نهایی آبگیری شده
	۲۱۰۴	۱۹۷۴	۱۸۲	۱۶	۳۸۳	باطله کلی کارخانه

## فصل دوم

مدل سازی آسیای گلوله‌ای و هیدروسیکلون