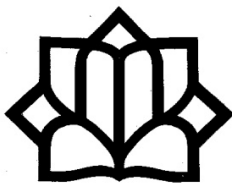


الحمد لله  
البرحمين!



دانشگاه کاشان  
دانشکده مهندسی  
گروه معدن

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد  
در رشته فرآوری مواد معدنی

عنوان:

**شبیه‌سازی آسیای میله‌ای کارخانه اسفوردی  
در محیط نرم‌افزار BMCS**

استاد راهنما:

دکتر اکبر فرزنانگان

به وسیله:

علیرضا ولیان

دی ماه ۱۳۸۹

تقدیم به  
پدر، مادر و همسر

## تشکر و قدردانی

در پایان این دوره تحصیلی بر خود لازم می‌دانم که در درجه اول از حمایت‌های بی‌دریغ پدر و مادرم کمال سپاسگزاری را به عمل آورم و برای آنها آرزوی سلامتی و طول عمر کنم. همچنین فداکاری‌ها و پشتیبانی‌های همسر را ارج می‌نهم و از ایشان به خاطر کمک در انجام بهتر این پروژه قدردانی می‌کنم.

از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر فرزندگان نخست به خاطر الگویی که برای من شد و دوم برای دانشی که در طول هفت سال بردبارانه به من آموخت سپاسگزاری می‌کنم. افتخار می‌کنم که در دو دوره تحصیلی‌ام از راهنمایی ایشان برای گذراندن پایان‌نامه بهره برده‌ام.

لازم است از استادی که در طول تحصیلات دانشگاهی‌ام بیشترین درس‌ها را در محضر او گذرانده‌ام، جناب آقای دکتر عبدالله‌زاده، به خاطر زحمتی که در طول سال‌ها برای آموزش من متحمل شده‌اند عمیقاً قدردانی کنم. همچنین از ایشان برای قبول زحمت داوری این پروژه سپاسگذارم.

بسیار متشکرم از استاد محترم جناب آقای دکتر شفایی برای پذیرش داوری این پروژه پایانی وقتی که برای مطالعه آن صرف کردند.

از مدیران و کارکنان مجتمع فسفات اسفوردی به ویژه جناب آقای مهندس توکلی بسیار تشکر می‌کنم؛ چرا که بدون همکاری‌ها و راهنمایی‌های ایشان این پروژه به انجام نمی‌رسید. همچنین از جناب آقای مهندس حافظی فر (مدیر پیشین مجتمع)، جناب آقای مهندس فتوحی (مدیر مجتمع)، جناب آقای اولیایی (مسئول روابط عمومی مجتمع) و جناب آقای مهندس حسینی (مسئول آزمایشگاه مجتمع) کمال تشکر را دارم.

## چکیده

در این پژوهش، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای در مورد ساختار، کاربرد، رفتار و مدل‌سازی آسیاهای میله‌ای انجام شد. سپس برنامه شبیه‌سازی آسیای میله‌ای بر پایه سه رویکرد به عنوان یک ماژول جدید به BMCS (BMCS-based Modular Comminution Simulator) اضافه شد. برای اعتبارسنجی نرم‌افزار، مطالعه موردی در خصوص آسیای میله‌ای کارخانه اسفوردی انجام شد. عملیات نمونه‌گیری در دو مرحله انجام شد که در نتیجه دو مجموعه داده به دست آمد. از مجموعه اول داده‌ها برای کالیبراسیون مدل‌ها استفاده شد. در فرآیند کالیبراسیون، از دو ابزار الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار NGOTC (Numerical Grinding Optimization Tools in C) بهره‌گیری شد. پس از کالیبراسیون مدل‌ها، با استفاده از مجموعه دوم داده‌ها مدل‌ها و برنامه شبیه‌ساز آسیای میله‌ای BMCS مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های واقعی، فرآیند شبیه‌سازی را مورد تأیید قرار داد. نتایج حاصل از مدل‌های مختلف با هم مقایسه شد و مورد تحلیل قرار گرفت. انجام این پژوهش زمینه لازم را برای بهینه‌سازی مدارهای خردایش شامل آسیای میله‌ای از جمله مدار خردایش کارخانه اسفوردی فراهم کرده است.

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی، شبیه‌سازی، آسیای میله‌ای، BMCS، الگوریتم ژنتیک،

NGOTC

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	پیشگفتار.....
۴	۱ مباحث مقدماتی.....
۵	۱-۱ مقدمه.....
۵	۱-۲ فسفر و فسفات.....
۷	۱-۳ آپاتیت.....
۷	۱-۴ مدل سازی ریاضی.....
۸	۱-۵ شبیه سازی.....
۹	۱-۶ کالبراسیون مدل.....
۹	۱-۷ تابع شکست.....
۱۱	۱-۸ تابع انتخاب.....
۱۱	۱-۹ آشنایی با BMCS.....
۱۳	۱-۱۰ آشنایی با آسیای میله ای.....
۱۶	۲ آشنایی با معدن و کارخانه فسفات اسفوردی.....
۱۷	۲-۱ مقدمه.....
۱۷	۲-۲ کانی شناسی و سنگ شناسی منطقه اسفوردی.....
۱۸	۲-۳ ناخالصی های شیمیایی همراه آپاتیت.....
۱۸	۲-۴ منشأ کانسار فسفات اسفوردی.....
۱۹	۲-۵ استخراج معدن.....
۱۹	۲-۶ ویژگی های خوراک و محصول کارخانه فسفات اسفوردی.....
۱۹	۲-۷ شرح مراحل فرآوری.....

۲۲	۸-۲ واحدهای کارخانه فرآوری
۲۲	۱-۸-۲ کارخانه سنگ شکنی
۲۵	۲-۸-۲ کارخانه پرعیارسازی
<b>۳۲</b>	<b>۳ مدل سازی ریاضی آسیای میله ای</b>
۳۳	۱-۳ مقدمه
۳۳	۲-۳ مدل ماتریسی
۳۴	۱-۲-۳ رفتار آسیای میله ای
۳۶	۲-۲-۳ مفهوم مراحل خردایش
۳۷	۳-۲-۳ رابطه ای برای پیش بینی محصول آسیا
۴۳	۴-۲-۳ به مقیاس کردن تعداد مراحل شکست
۴۴	۵-۲-۳ ویژگی های مدل
۴۵	۳-۳ مدل موازنه جمعیت و جریان قالبی
۴۵	۱-۳-۳ اساس مدل
۴۶	۲-۳-۳ تغییر زمان اقامت با اندازه ذره
۴۸	۳-۳-۳ استفاده از رابطه آسیای ناپیوسته
۵۰	۴-۳-۳ تابع انتخاب
۵۱	۴-۳ مدل موازنه جمعیت و توزیع زمان اقامت ولر
۵۲	۱-۴-۳ مدل توزیع زمان اقامت ولر
۵۳	۲-۴-۳ پیش بینی محصول آسیا با مدل زمان اقامت ولر
۵۴	۳-۴-۳ تابع انتخاب
<b>۵۵</b>	<b>۴ شبیه سازی آسیای میله ای کارخانه اسفوردی</b>
۵۶	۱-۴ مقدمه

۵۶	۲-۴ اضافه کردن ماژول آسیای میله‌ای به BMCS
۵۸	۳-۴ ثبت وضعیت آسیای در حال کار
۵۸	۴-۴ تعیین تابع شکست کانسنگ
۶۵	۵-۴ توزیع زمان اقامت در آسیا
۶۵	۶-۴ کاربرد مدل ماتریسی
۶۵	۱-۶-۴ کالیبراسیون مدل
۶۷	۲-۶-۴ شبیه‌سازی و اعتبارسنجی
۶۷	۷-۴ کاربرد مدل موازنه جمعیت و زمان اقامت جریان قالبی
۶۷	۱-۷-۴ کالیبراسیون مدل
۶۸	۲-۷-۴ شبیه‌سازی و اعتبارسنجی
۷۰	۸-۴ کاربرد مدل موازنه جمعیت و مدل توزیع زمان اقامت ولر
۷۰	۱-۸-۴ کالیبراسیون مدل
۷۱	۲-۸-۴ شبیه‌سازی و اعتبارسنجی
<b>۷۳</b>	<b>۵ بحث و نتیجه‌گیری</b>
۷۴	۱-۵ شناخت مدل‌های آسیای میله‌ای
۷۵	۲-۵ شبیه‌سازی دقیق آسیاهای میله‌ای
۷۵	۳-۵ مقایسه نتایج مدل‌های مختلف آسیاهای میله‌ای
۷۷	۴-۵ ارتقای BMCS
۷۸	۵-۵ زمینه‌سازی برای شبیه‌سازی واحدهای سنگ شکنی
<b>۷۹</b>	<b>۶ پیشنهادها</b>
<b>۸۲</b>	<b>فهرست منابع</b>
<b>۸۵</b>	<b>پیوست‌ها</b>



۸۶	پیوست ۱: کاربری نرم افزار BMCS .....
۱۰۸	پیوست ۲: آشنایی بیشتر با آسیای میله ای .....
۱۲۴	پیوست ۳: داده های به دست آمده از برداشت اول و دوم از آسیا .....
	پیوست ۴: تابع شکست غیرتجمعی و تجمعی محاسبه شده از سه روش برای نمونه
۱۲۸	۲۱۲ و ۶۰۰ میکرونی .....
	پیوست ۵: مقادیر تابع شکست تجمعی تخمین زده شده برای استفاده در این
۱۳۰	پژوهش .....
۱۳۱	پیوست ۶: پرونده های ورودی و خروجی BMCS .....

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲	مشخصات ذخیره و خوراک کارخانه اسفوردی طبق مدارک طراحی	۲۰
جدول ۲-۲	مشخصات عملیاتی خوراک کارانه	۲۰
جدول ۳-۲	مشخصات عملیاتی تولید	۲۰
جدول ۴-۲	مشخصات فنی و عملیاتی کارخانه سنگ شکنی طبق طراحی	۲۴
جدول ۵-۲	مشخصات فنی و عملیاتی سنگ شکن‌ها	۲۵
جدول ۶-۲	مشخصات فنی و عملیاتی سرنند دو طبقه	۲۵
جدول ۷-۲	مشخصات کارخانه پرعیارسازی طبق طراحی	۲۶
جدول ۸-۲	مشخصات فنی و عملیاتی آسیای میله‌ای طبق طراحی	۲۷
جدول ۹-۲	مشخصات فنی و عملیاتی آسیای گلوله‌ای طبق طراحی	۲۸
جدول ۱۰-۲	مشخصات فنی و عملیاتی هیدروسیکلون طبق طراحی	۲۸
جدول ۱۱-۲	مشخصات فیزیکی سیکلون	۲۸
جدول ۱-۳	مرحله $n$ ام خردایش که در آن $C_1, 1$ تا $C_n, n$ برابر با صفر است	۴۰
جدول ۱-۴	مشخصات آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی	۵۹
جدول ۲-۴	توزیع اندازه واسطه خردایش در آسیای آزمایشگاهی	۵۹
جدول ۳-۴	مقادیر پارامترهای مختلف برای نمونه‌های تک اندازه شده	۶۱
جدول ۴-۴	مقادیر بهینه رابطه برادبنت و کلکات	۶۵
جدول ۵-۴	پارامترهای توزیع زمان اقامت در آسیای میله‌ای بر اساس مدل ولر	۶۵
جدول ۶-۴	نتایج کالبراسیون مدل ماتریسی با مجموعه اول داده‌ها	۶۶
جدول ۷-۴	خطای شبیه‌سازی با مدل ماتریسی	۶۷

جدول ۴-۸ مقادیر بهینه پارامترهای تابع انتخاب در کالیبراسیون مدل جریان قالبی

با مجموعه اول داده‌ها ..... ۶۸

جدول ۴-۹ خطای شبیه‌سازی با مدل جریان قالبی ..... ۶۹

جدول ۴-۱۰ خطای پیش‌بینی (شبیه‌سازی) دانه‌بندی با مدل ولر ..... ۷۲

جدول ۵-۱ مقایسه خطای پیش‌بینی‌های شبیه‌ساز با استفاده از مدل‌های مختلف ... ۷۶

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۲	شکل ۱-۱ نمودار عملیات BMCS.....
۱۳	شکل ۲-۱ برشی از یک آسیای میله‌ای.....
۱۵	شکل ۳-۱ عمل خردایش میان میله‌ها.....
۲۳	شکل ۱-۲ شمای عملیات کارخانه فسفات اسفوردی.....
۳۴	شکل ۱-۳ اثر غربالگری میله‌ها در آسیای میله‌ای.....
۳۶	شکل ۲-۳ فلوچارت یک مرحله از خردایش در آسیای میله‌ای.....
۵۲	شکل ۳-۳ مخازن پی‌درپی در مدل توزیع زمان اقامت ولر.....
۵۷	شکل ۱-۴ نمودار عملیات ماژول آسیای میله‌ای.....
۶۰	شکل ۲-۴ آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه کاشان.....
۶۰	شکل ۳-۴ واسطه خردایش در آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی.....

## فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۱-۳ تغییرات توزیع اندازه ذرات کانسنگ از ابتدا تا انتهای آسیا	۳۵
نمودار ۲-۳ توزیع اندازه ذرات گالن، مارماتیت و گانگ در محصول آسیای میله‌ای	۳۵
نمودار ۳-۳ تابع انتخاب آسیای میله‌ای	۴۳
نمودار ۴-۳ اعتبارسنجی رابطه ۱۴-۳	۴۴
نمودار ۵-۳ سرعت نسبی ذرات با اندازه‌های مختلف در شدت جریان‌های مختلف	۴۷
نمودار ۱-۴ دانه‌بندی‌های اندازه‌گیری شده خوراک و محصول در مجموعه اول داده‌ها	۵۹
نمودار ۲-۴ دانه‌بندی‌های اندازه‌گیری شده خوراک و محصول در مجموعه دوم داده‌ها	۵۹
نمودار ۳-۴ تابع شکست نمونه ۲۱۲ میکرونی با استفاده از روش اصلاح شده هریست و فیورستنا	۶۲
نمودار ۴-۴ تابع شکست نمونه ۶۰۰ میکرونی با استفاده از روش اصلاح شده هریست و فیورستنا	۶۳
نمودار ۵-۴ مقایسه دو تابع شکست طبقه ۲۱۲ میکرون، به دست آمده در پژوهش پیشین و فعلی	۶۳
نمودار ۶-۴ مقایسه دو تابع شکست طبقه ۶۰۰ میکرون، به دست آمده در پژوهش پیشین و فعلی	۶۴
نمودار ۷-۴ مقایسه مجموعه اول داده‌های واقعی با منحنی کالیبراسیون مدل ماتریسی	۶۶

- نمودار ۴-۸ مقایسه مجموعه دوم داده‌های واقعی با نتایج شبیه‌سازی با مدل  
 ماتریسی ..... ۶۷
- نمودار ۴-۹ نمودار تابع انتخاب برازش شده با مدل جریان قالبی ..... ۶۹
- نمودار ۴-۱۰ مقایسه مجموعه اول داده‌های واقعی با منحنی کالیبراسیون با مدل  
 جریان قالبی ..... ۶۹
- نمودار ۴-۱۱ مقایسه مجموعه دوم داده‌های واقعی با نتایج شبیه‌سازی با مدل  
 جریان قالبی ..... ۷۰
- نمودار ۴-۱۲ تابع انتخاب به دست آمده با مدل ولر ..... ۷۱
- نمودار ۴-۱۳ مقایسه مجموعه اول داده‌های واقعی با منحنی کالیبراسیون با مدل  
 ولر ..... ۷۱
- نمودار ۴-۱۴ مقایسه مجموعه دوم داده‌های واقعی با نتایج شبیه‌سازی با مدل ولر .... ۷۲
- نمودار ۵-۱ مقایسه داده‌های واقعی با پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی با استفاده از  
 مدل‌های مختلف ..... ۷۵

## فهرست علائم و اختصارات

BMCS	BMCS-based Modular Comminution Simulator
ECS	Efficiency Curve Simulator
HPGR	High Pressure Grinding Rolls
tph	Tons per hour
RTD	Residence Time Distribution
PSD	Particle Size Distribution
JKMRC	Jullius Kruttschnitt Mineral Research Center
IN	Intercept
SL	Slope
MC	Mill Constant
MODSIM	Modular Simulator
NGOTC	Numerical Grinding Optimization Tools in C
BFDS	Breakage Function Determination Software
SSD	Sum of Squared Differences
ASTM	the American Society for Testing and Materials

# پشگفتار



خردایش مواد معدنی از فرآیندهای اصلی در فرآوری مواد معدنی به شمار می‌رود. این فرآیند برای آزادسازی کانی‌های با ارزش درگیر با کانی‌های گانگ، افزایش سطح ویژه، تهیه مواد با دانه‌بندی مشخص و اهداف دیگر انجام می‌شود. عملیات خردایش مواد می‌تواند در مراحل مختلف و متعدد مانند سنگ‌شکنی و آسیاکنی در مراحل اولیه و ثانویه صورت گیرد. در مراحل مختلف خردایش به دلایل مختلف، انرژی الکتریکی زیادی تلف می‌شود و در عمل به ویژه در بخش آسیاکنی، تنها بخش اندکی از انرژی ماشین‌آلات صرف عمل خردایش و شکست ذرات می‌گردد. با این حال هر روز تقاضا برای محصولات با کیفیت بالاتر افزایش می‌یابد و قوانین بین‌المللی برای کاهش مصرف انرژی تشدید می‌شود. از این رو، بهینه‌سازی فرآیند خردایش از نگاه مهندسی اهمیت فراوانی دارد و در چند دهه گذشته، مطالعات و بررسی‌های گسترده‌ای توسط محققان در این زمینه به عمل آمده است.

شبیه‌سازی فرآیندی است که طی آن، عملکرد یک مدار یا قسمتی از آن توسط یک نرم‌افزار رایانه‌ای پیش‌بینی می‌شود. نرم‌افزار شبیه‌ساز از مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی رفتار هر دستگاه استفاده می‌کند. مدل‌های ریاضی مجموعه روابطی هستند که رفتار یک دستگاه خاص را توصیف می‌کنند.

بهینه‌سازی پارامترهای تجهیزات مدارهای آسیاکنی به صورت سعی و خطا (بدون استفاده از شبیه‌سازی) کاری بسیار دشوار و پرهزینه است؛ به طوری که مستلزم توقف

عملیات و در نتیجه کاهش تولید می‌باشد. اما با وجود نرم‌افزارهای شبیه‌ساز، می‌توان عملکرد دستگاه را در شرایط مختلف عملیاتی پیش‌بینی نمود و زمینه لازم برای بهینه‌سازی مدار را فراهم کرد. در واقع، شبیه‌سازی حالت پایدار مدار آسیاکنی که بر اساس مدل‌های ریاضی معتبر انجام می‌شود، ابزاری علمی برای بهینه‌سازی مدار است.

در طراحی‌های جدید مدارهای آسیاکنی، استفاده از آسیای میله‌ای منسوخ شده است؛ اما هنوز آسیاهای میله‌ای در حال کار بسیاری وجود دارند که عملکرد صحیح آنها مورد توجه مهندسين فرآیند است. از اینرو، انجام مطالعات بهینه‌سازی بر روی مدارهای شامل آسیاهای میله‌ای به علت فرسوده بودن این دستگاه‌ها ضرورت دارد.

شبیه‌سازی آسیای میله‌ای به عنوان یکی از ماژول‌های BMCS، امکان بهینه‌سازی مدارهای آسیاکنی شامل آسیای میله‌ای را فراهم می‌کند. در این پژوهش، قابلیت شبیه‌سازی آسیای میله‌ای به این نرم‌افزار اضافه شد. مطالعه موردی در این پژوهش بر روی آسیای میله‌ای کارخانه اسفوردی انجام گرفت.

۱

## مباحث مقدماتی

## ۱-۱ مقدمه

در این فصل به معرفی کوتاه برخی نام‌ها، اصطلاحات، مفاهیم بنیادی و ابزارها پرداخته می‌شود که اشاره به آنها از آن روی که در فصل‌های بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند مفید خواهد بود. در ابتدای این فصل برخی مفاهیم کانی‌شناختی مطرح و سپس به مفاهیم مرتبط با مدل‌سازی و شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. پس از آن، نرم‌افزار BMCS و آسیای میله‌ای به اختصار معرفی می‌گردند.

## ۲-۱ فسفر و فسفات

عنصر غیرفلزی فسفر در طبیعت نسبتاً کمیاب است. این عنصر کمتر از یک دهم درصد از جرم پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. برخی کانی‌ها که از فسفر تشکیل شده‌اند، عبارت از آپاتیت<sup>۱</sup>، واولیت<sup>۲</sup>، وی‌ویانیت<sup>۳</sup> و فسفریت<sup>۴</sup> می‌باشد. مهم‌ترین منابع فسفر، فسفریت یا کانسنگ فسفات می‌باشد [۱].

کانسنگ فسفات جزء منابع تجدید ناپذیر طبیعی است که غالباً در نهشته‌های رسوبی و آذرین یافت می‌شود. بیشترین میزان تولید فسفات در جهان، در کشاورزی استفاده می‌شود [۲]. حدود ۹۵٪ کانسنگ فسفات استخراج شده برای تولید کود،

<sup>۱</sup>Apatite

<sup>۲</sup>Wavellite

<sup>۳</sup>Vivianite

<sup>۴</sup>Phosphorite