بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی

طراحی شبیه‌ساز اختصاصی مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران

نگارش:

مقداد مجدی اوغول‌بیگ

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا خالصی

دی ماه ۱۳۹۱

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی

طراحی شبیه‌ساز اختصاصی مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا خالصی

استاد مشاور:

دکتر سید محمدجواد کلینی

نگارش: مقداد مجدی اوغول‌بیگ

دی ماه ۱۳۹۱

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای مقداد مجدی اوغول بیگ پایان نامه ٦ واحدی خود را با عنوان **طراحی شبیه ساز اختصاصی مدار خردایش کارخانه فرآوری طلای زرشوران** در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی معدن - فرآوری موادمعدنی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمدرضا خالصی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر سید محمد جواد کلینی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمود عبداللهی	استاد	
استاد ناظر	دکتر اکبر فرزانگان	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمود عبداللهی	استاد	

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

مقداد مجدی اوغول بیگ

امضاء

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته **مهندسی معدن (گرایش فرآوری مواد معدنی)** است که در سال**۱۳۹۱** در دانشکده **فنی و مهندسی** دانشگاه **تربیت مدرس** به راهنمایی جناب آقای **دکتر محمد رضا خالصی**، مشاوره جناب آقای **دکتر سید محمد جواد کلینی** از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **مقداد مجدی اوغول‌بیگ** دانشجوی رشته **مهندسی معدن (گرایش فرآوری مواد معدنی)** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **مقداد مجدی اوغول‌بیگ**

تاریخ و امضا:

تقدیم به:

پدر و مادرم که هم وجودم وام دار حمایت های بی دریغشان است. پروانه ای خواهم ماند در طوافی مدام گرداگرد شمع درخشان وجودشان

و

خانواده گرامی ام به پاس عاطفه سرشارشان و لبخند چشمانشان که ارمغان همه خوبی هاست

و

همه کسانی که باغ جانم از آثار صحبتشان عطرافشان و گلباران است

تشکر و قدردانی:

شکوهت پاینده باد ای معلم که درخشان‌ترین ستاره‌ای

خالصانه‌ترین سپاس نثار استاد دوران پژوهشم، جناب آقای **دکتر محمدرضا خالصی** که در مقطع کارشناسی ارشد از راهنمایی‌های ارزنده و حمایت‌هایشان بهره‌مند بودم و در کمال فروتنی مرا در انجام این رساله هدایت نمودند.

با تشکر و قدردانی از استاد مشاور گرامی‌ام جناب آقای **دکتر سید محمد جواد کلینی** که دلسوزانه بنده را در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند.

از اساتید ارجمند و گرامی جناب آقای **دکتر محمود عبداللهی** و جناب آقای **دکتر احمد خدادادی** به دلیل زحماتشان در طول دوران تحصیلم کمال تشکر را دارم.

و همه‌ی آنان که مرا علم آموختند

چکیده

عملکرد مدارهای آسیاکنی تأثیر بسزایی در فرآیندهای بعد از آن دارد. شبیه‌سازی پایای فرآیند خردایش ابزاری است که توسط آن می‌توان تخمینی مناسب از نحوه‌ی عملکرد یک فرآیند به‌دست آورد و از این طریق در جهت بهبود کارائی آن اقدام نمود. تمرکز این پایان‌نامه بر طراحی شبیه‌ساز پایای مدارهای خردایش شامل آسیای گلوله‌ای و هیدروسیکلون به عنوان ابزاری در جهت نیل به این هدف بوده است.

در این پایان‌نامه، شبیه‌ساز اختصاصی مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران بر پایه‌ی روش شبیه‌سازی ترتیبی واحد به واحد طراحی شد. با داشتن پارامترهای شکست ماده‌ی معدنی شامل تابع انتخاب و تابع شکست ماده‌ی معدنی، توزیع زمان ماند مواد در آسیای گلوله‌ای و همچنین پارامترهای اختصاصی هیدروسیکلون می‌توان مدارهای خردایش متشکل از واحدهای مذکور را با دقت بالایی توسط این شبیه‌ساز، شبیه‌سازی نمود. الگوریتم‌های محاسبه‌ی برگشتی، در مواردی که امکان تعیین پارامترهای بحرانی مورد نیاز در شبیه‌سازی به صورت مستقیم وجود نداشت، طراحی و مورد استفاده قرار گرفت.

شبیه‌ساز طراحی شده پس از تحصیل و سپس تلفیق داده‌های حاصل از اندازه‌گیری و در نهایت، واسنجی مدل‌های مربوط به واحدهای موجود در مدار خردایش کارخانه‌ی زرشوران، آزموده شد. در محاسبه‌ی پارامترهای ورودی شبیه‌ساز طراحی شده از هیچ نرم‌افزار جانبی دیگری استفاده نشد و سعی شد تمام محاسبه‌های لازم جهت شبیه‌سازی یک مدار خردایش توسط همین بسته‌ی شبیه‌سازی انجام شود تا فهم جامعی از تمامی زوایای چنین شبیه‌سازی در این پروژه حاصل شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها با دقت بالایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌برداری از کارخانه منطبق هستند. به‌علاوه نشان داده شد که استفاده از داده‌های اصلاح شده در فرآیند واسنجی مدل‌ها، منجر به نتایج بسیار بهتری در شبیه‌سازی می‌شود. این موضوع با مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از سه دسته داده شامل داده‌های اولیه، میانگین داده‌ها و داده‌های تلفیق شده تأیید شد. بیشترین میزان خطا از مقدار ۱۸/۰۸ درصد در مورد دبی مواد جامد خشک خروجی از آسیای گلوله‌ای، زمانی که از داده‌های میانگین برای شبیه‌سازی استفاده شد، به مقدار ۴/۵۷ درصد در مورد دبی آب در جریان ته‌ریز هیدروسیکلون، زمانی که از داده‌های تلفیق شده برای شبیه‌سازی استفاده شد، کاهش یافت.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی پایای مدارهای خردایش، کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران، شبیه‌ساز اختصاصی، الگوریتم‌های محاسبه‌ی برگشتی، آسیای گلوله‌ای، هیدروسیکلون

فهرست مطالب

فصل ۱ – کلیات ۲

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- اهداف پایان‌نامه ۳

۱-۳- دست‌آوردهای پایان‌نامه ۴

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۴

فصل ۲- مروری بر مطالعات انجام شده و مبانی نظری ۷

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- مدلسازی ریاضی در فرآیند خردایش ۷

۲-۲-۱- مکانیزم‌های شکست در فرآیند خردایش ۸

۲-۳- مدل‌های موازنه‌ی جمعیتی در مدلسازی فرآیند خردایش ۱۰

۲-۳-۱- مدل ماتریسی ۱۱

۲-۳-۲- مدل سینتیکی ۱۵

۲-۳-۲-۱- مدل آسیاکنی ناپیوسته ۱۵

۲-۳-۲-۲- مدل آسیاکنی پیوسته ۱۷

۲-۴- پارامترهای شکست ماده‌ی معدنی ۱۸

۲-۴-۱- تابع شکست ماده‌ی معدنی ۱۸

۲-۴-۱-۱- روش‌های آزمایشگاهی (مستقیم) تعیین تابع شکست ماده‌ی معدنی ۲۱

۲-۴-۱-۲- روش‌های محاسباتی تعیین تابع شکست ماده‌ی معدنی ۲۳

۲-۴-۲- تابع انتخاب ۲۵

۲-۴-۲-۱- روش آزمایشگاهی تعیین تابع انتخاب ۲۶

۲-۴-۲-۲- روش‌های محاسباتی تعیین تابع انتخاب ۲۷

۲-۴-۲-۳- بزرگ‌مقیاس کردن تابع انتخاب ۲۹

۲-۵- توزیع زمان ماند ۳۱

۲-۵-۱- توزیع زمان ماند در سیستم‌های پیوسته‌ی صنعتی ۳۲

۲-۵-۱-۱- مدل توزیع زمان ماند ولر ۳۳
۲-۵-۱-۲- مدل n مخلوط کننده‌ی کامل ۳۴
۲-۵-۲- اندازه‌گیری و تعیین توزیع زمان ماند مواد در یک واحد خردایش ۳۴
۲-۵-۳- توزیع زمان ماند در مدارهای بسته ۳۵
۲-۵-۴- تعیین توزیع زمان ماند متوسط مواد در آسیا به روش نظری ۳۶
۲-۶- مدلسازی هیدروسیکلون‌ها ۳۹
۲-۶-۱- مدل مفهومی کارائی هیدروسیکلون ۴۱
۲-۷- نمونه‌برداری و واسنجی مدل ۴۵
۲-۷-۱- نمونه‌برداری و به‌دست‌آوردن داده‌ها ۴۵
۲-۷-۲- تلفیق داده‌ها (موازنه‌ی جرم) ۴۶
۲-۷-۳- تعیین پارامترهای مدل (واسنجی مدل) ۴۸
۲-۸- شبیه‌سازی مدارهای خردایش ۴۸
فصل ۳- مواد و روش‌ها ۵۲
۳-۱- مقدمه ۵۲
۳-۲- طراحی نمونه‌برداری ۵۲
۳-۲-۱- شرح عملیات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه‌ها ۵۹
۳-۳- تعیین پارامترهای شکست ماده‌ی معدنی ۶۲
۳-۳-۱- تعیین تابع شکست ماده‌ی معدنی ۶۳
۳-۳-۲- تعیین تابع انتخاب (نرخ ویژه‌ی شکست ماده‌ی معدنی) ۶۶
۳-۳-۲-۱- بزرگ‌مقیاس کردن تابع انتخاب ۶۷
۳-۴- تعیین توزیع زمان ماند مواد در آسیای گلوله‌ای ۶۸
۳-۴-۱- روش آزمون ردیاب ۶۸
۳-۴-۱-۱- نتایج حاصل از آزمون ردیاب با استفاده از پودر آهن به عنوان ردیاب ۷۰
۳-۴-۱-۲- نتایج حاصل از آزمون ردیاب با استفاده از آهک به عنوان ردیاب ۷۲
۳-۴-۲- محاسبه‌ی برگشتی پارامترهای مدل توزیع زمان ماند مواد در آسیای گلوله‌ای ۷۴
۳-۵- تعیین پارامترهای اختصاصی هیدروسیکلون در مدل مفهومی ۷۶

۳-۶- شبیه‌ساز مدارهای خردایش ۷۶
۳-۶-۱- مقدمه ۷۶
۳-۶-۲- ساختار برنامه ۷۷
۳-۶-۳- مدل‌های ریاضی ۷۹
۳-۶-۳-۱- مدل ریاضی آسیای گلوله‌ای ۷۹
۳-۶-۳-۲- مدل ریاضی هیدروسیکلون ۸۰
۳-۶-۴- شبیه‌سازی مدار بسته‌ی آسیاکنی ۸۰
۳-۶-۴-۱- داده‌های ورودی مورد نیاز جهت شبیه‌سازی ۸۱
۳-۶-۴-۲- خروجی‌های فرآیند شبیه‌سازی ۸۱
فصل ۴- نتایج و بحث ۸۴
۴-۱- نتایج اندازه‌گیری دبی جریان‌های مدار خردایش ۸۴
۴-۲- تعیین توزیع دانه‌بندی مواد در نقاط نمونه‌برداری شده ۸۵
۴-۳- تعیین تابع شکست ماده‌ی معدنی ۸۵
۴-۴- تعیین تابع انتخاب آزمایشگاهی ۸۷
۴-۴-۱- بزرگ‌مقیاس کردن تابع انتخاب ۸۸
۴-۵- تعیین توزیع زمان ماند مواد در آسیای گلوله‌ای ۹۱
۴-۶- کالیبراسیون مدل مفهومی برای هیدروسیکلون مدار خردایش کارخانه فرآوری طلای زرشوران ۹۳
۴-۷- نتایج شبیه‌سازی مدار خردایش کارخانه فرآوری طلای زرشوران با استفاده از شبیه‌ساز اختصاصی طراحی شده ۹۴
۴- ۸- تکرار شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های تلفیق شده ۹۷
فصل ۵– نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۰۴
۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۴
۵-۲- پیشنهادها ۱۰۸
منابع و مراجع ۱۱۰
پیوست (الف)- نمونه‌ای از برگه‌ی نمونه‌برداری ۱۱۵
پیوست (ب)- محاسبه‌ی زمان ماند میانگین آسیای گلوله‌ای کارخانه زرشوران به روش آستین ۱۱۶

پیوست (ج)- مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی لحظه‌ای دبی، درصد جامد و دانسیته‌ی مواد در نقاط نمونه‌برداری از مدار خردایش کارخانه‌ی زرشوران ۱۱۸

پیوست (د)- نتایج حاصل از خردایش در آزمون تعیین نوع تابع شکست از نقطه نظر نرمال‌شونده یا غیر نرمال‌شونده بودن ۱۲۱

پیوست (ه)- نتایج حاصل از خردایش در آزمون تعیین تابع شکست تجمعی ماده‌ی معدنی جهت استفاده در شبیه‌سازی ۱۲۳

پیوست (و)- اعتبارسنجی برنامه‌ی نوشته شده در محیط نرم‌افزار *MATLAB* جهت محاسبه‌ی تابع شکست تجمعی ماده‌ی معدنی..... ۱۲۴

پیوست (ز)- اعتبارسنجی شبیه‌ساز طراحی شده در مورد شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای در مدار باز ۱۲۸

پیوست (ح)- اعتبارسنجی شبیه‌ساز طراحی شده در مورد شبیه‌سازی هیدروسیکلون در مدار باز..... ۱۳۱

پیوست (ط)- داده‌های توزیع دانه‌بندی نمونه‌های برداشت شده از مدار خردایش کارخانه زرشوران ۱۳۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۲- ۱- فرآیند از هم پاشیدگی که منجر به تولید طیف وسیعی از ذرات می‌شود ۹
شکل ۲- ۲- شکست توسط کلیواژ بدون شکست متعاقب ذرات فرزند ۹
شکل ۲- ۳- سایش و لب‌پر شدن که منجر به تولید دو گونه از توزیع ذرات می‌شود ۹
شکل ۲- ۴- توزیع ذرات شکسته‌شده از طبقه‌ی ابعادی j به طبقه‌های ابعادی کوچک‌تر (تابع شکست) ۱۹
شکل ۲- ۵- نمایش مقادیر B به صورت یک منحنی توزیع ۲۰
شکل ۲- ۶- تصویر شماتیک الگوریتم محاسبه‌ی برگشتی همزمان توابع شکست و انتخاب ۲۴
شکل ۲- ۷- تغییرات تابع انتخاب (پارامتر نرخ) با اندازه‌ی ذرات ۲۵
شکل ۲- ۸- نحوه‌ی تعیین تابع انتخاب به روش آزمایشگاهی ۲۷
شکل ۲- ۹- گره‌های تابع نرخ شکست در مدل بزن ۲۹
شکل ۲- ۱۰- تبدیل منحنی غلظت - زمان به منحنی توزیع زمان ماند ۳۱
شکل ۲- ۱۱- شکل کلی تابع ضربه ($Dirac$) ۳۲
شکل ۲- ۱۲- مدل توزیع زمان ماند ولر ۳۳
شکل ۲- ۱۳- مدل توزیع زمان ماند n مخلوط کننده‌ی کامل ۳۴
شکل ۲- ۱۴- فضای داخل آسیای گلوله‌ای زمانی که آسیا در حالت پایداری ثابت نگه داشته شده است ۳۷
شکل ۲- ۱۵- مسیر معمول حرکت یک ذره در هیدروسیکلون ۳۹
شکل ۲- ۱۶- منحنی جدایش معمول در یک هیدروسیکلون ۴۰
شکل ۲- ۱۷- نحوه عملکرد مدل مفهومی هیدروسیکلون ۴۱
شکل ۲- ۱۸- روند عمومی تلفیق داده‌های کارخانه ۴۷

شکل ۳- ۱- فلوشیت مدار خردایش کارخانه فرآوری طلای زرشوران ۵۳
شکل ۳- ۲- آسیای گلوله‌ای مدار خردایش کارخانه فرآوری طلای زرشوران ۵۳
شکل ۳- ۳- الف) خوراک دهنده‌ی مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران ب) محل تخلیه‌ی مواد از خوراک دهنده بر روی نوارنقاله و انتقال مواد به ورودی آسیای گلوله‌ای ۵۴
شکل ۳- ۴- نقطه‌ی ورودی آسیای گلوله‌ای ۵۵
شکل ۳- ۵- تجهیزات نمونه‌برداری مدرج شده جهت برداشت نمونه‌ی معرف پالپ از جریان‌های مواد و اندازه‌گیری دبی آن‌ها ۵۵
شکل ۳- ۶- تصویر خروجی آسیای گلوله‌ای کارخانه فرآوری زرشوران و وسیله نمونه‌برداری از این نقطه ... ۵۶
شکل ۳- ۷- تصویر هیدروسیکلون موجود در مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران و نمایش محل شیرهای انحراف جریان ۵۷

شکل ۳- ۸- الگوریتم برنامه‌نویسی شده جهت محاسبه‌ی پارامترهای مدل استاندارد آستین برای تابع انتخاب آزمایشگاهی ۶۸
شکل ۳- ۹- الگوریتم طراحی شده برای محاسبه‌ی برگشتی پارامترهای مدل زمان ماند مواد در آسیای گلوله‌ای ۷۵
شکل ۳- ۱۰- تصویر پوسته‌ی گرافیکی شبیه‌ساز اختصاصی مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران ۷۸

شکل ۴- ۱- نقاط نمونه‌برداری شده از مدار خردایش کارخانه فرآوری طلای زرشوران ۸۴
شکل ۴- ۲- توزیع دانه‌بندی مواد در نقاط نمونه‌برداری ۸۵
شکل ۴- ۳- تابع شکست تجمعی ماده‌ی معدنی ۸۷
شکل ۴- ۴- تابع انتخاب در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی ۹۱
شکل ۴- ۵- منحنی جدایش تصحیح شده و واقعی هیدروسیکلون ۹۴
شکل ۴- ۶- توزیع دانه‌بندی محصول آسیا در دو حالت شبیه‌سازی شده و واقعی ۹۵
شکل ۴- ۷- توزیع دانه‌بندی ته‌ریز هیدروسیکلون در دو حالت شبیه‌سازی شده و واقعی ۹۵
شکل ۴- ۸- توزیع دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون در دو حالت شبیه‌سازی شده و واقعی ۹۶
شکل ۴- ۹- توزیع دانه‌بندی محصول آسیای گلوله‌ای در دو حالت شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های اصلاح شده و واقعی ۱۰۰
شکل ۴- ۱۰- توزیع دانه‌بندی مواد در جریان ته‌ریز هیدروسیکلون در دو حالت شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های اصلاح شده و واقعی ۱۰۰
شکل ۴- ۱۱- توزیع دانه‌بندی مواد در جریان سرریز هیدروسیکلون در دو حالت شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های اصلاح شده و واقعی ۱۰۱

شکل ۵- ۱- توزیع دانه‌بندی خروجی آسیای گلوله‌ای در سه حالت واقعی و شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های میانگین و اصلاح شده ۱۰۶
شکل ۵- ۲- توزیع دانه‌بندی ته‌ریز هیدروسیکلون در سه حالت واقعی و شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های میانگین و اصلاح شده ۱۰۷
شکل ۵- ۳- توزیع دانه‌بندی خروجی آسیای گلوله‌ای در سه حالت واقعی و شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های میانگین و اصلاح شده ۱۰۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۲- ۱- موازنه‌ی جرم برای یک فرآیند کاهش ابعادی ۱۱
جدول ۲- ۲- توسعه‌ی معادله‌ی عمومی ماتریسی فرآیند شکست ۱۲
جدول ۲- ۳- بازه‌ی معمول پارامترهای مدل تابع شکست، مدل استاندارد آستین ۲۳
جدول ۲- ۴- بازه‌ی معمول پارامترهای مدل تابع انتخاب، مدل استاندارد آستین ۲۸

جدول ۳- ۱-سری سرندی انتخاب شده برای انجام آنالیزهای سرندی ۶۱
جدول ۳- ۲- نتایج حاصل از اندازه‌گیری دبی جریان در نقاط نمونه‌برداری شده ۶۲
جدول ۳- ۳- نتایج حاصل از اندازه‌گیری دانسیته و درصد جامد مواد در نقاط نمونه‌برداری شده ۶۲
جدول ۳- ۴- مشخصات آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی به کار رفته در آزمون‌های خردایش ۶۴
جدول ۳- ۵- مقادیر تابع شکست تجمعی ماده‌ی معدنی برای دو طبقه‌ی ابعادی ۱۹۰۵۰ و ۱۲۷۰۰ میکرون جهت تعیین نوع تابع شکست تجمعی ماده‌ی معدنی از نقطه نظر نرمال شونده یا غیر نرمال شونده بودن ۶۶
جدول ۳- ۶- داده‌های حاصل از آزمون ردیاب اول با استفاده از پودر آهن به عنوان ردیاب ۷۱
جدول ۳- ۷- داده‌های حاصل از آزمون ردیاب دوم با استفاده از آهک به عنوان ردیاب ۷۳

جدول ۴- ۱- تابع شکست تجمعی ماده‌ی معدنی جهت استفاده در شبیه‌سازی ۸۶
جدول ۴- ۲- مقادیر تابع انتخاب آزمایشگاهی ۸۸
جدول ۴- ۳- مقادیر پارامترهای مدل استاندارد آستین برای تابع انتخاب آزمایشگاهی ۸۸
جدول ۴- ۴- داده‌های لازم برای بزرگ‌مقیاس کردن تابع انتخاب ۸۹
جدول ۴- ۵- مقادیر تابع انتخاب بزرگ‌مقیاس شده ۹۰
جدول ۴- ۶- داده‌های مورد نیاز جهت محاسبه‌ی زمان ماند میانگین مواد در داخل آسیای گلوله‌ای ۹۱
جدول ۴- ۷- مقادیر تخمینی پارامترهای مدل توزیع زمان ماند ولر ۹۲
جدول ۴- ۸- مقادیر پارامترهای تخمینی مدل مفهومی هیدروسیکلون ۹۳
جدول ۴- ۹- میزان دبی در نقاط مختلف مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران در دو حالت شبیه‌سازی شده و واقعی (واحد: تن بر ساعت) ۹۶
جدول ۴- ۱۰- درصد جامد در نقاط مختلف مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران در دو حالت شبیه سازی شده و واقعی (واحد: درصد) ۹۶
جدول ۴- ۱۱- داده‌های حاصل از اندازه‌گیری پس از انجام فرآیند تلفیق داده‌ها بر روی آن‌ها ۹۸
جدول ۴- ۱۲- مقادیر پارامترهای مدل توزیع زمان ماند محاسبه شده با استفاده از داده‌های اصلاح شده ۹۹
جدول ۴- ۱۳- پارامترهای حاصل از کالیبراسیون مدل مفهومی هیدروسیکلون با استفاده از داده‌های اصلاح شده ۹۹

جدول ۴- ۱۴- میزان دبی در نقاط مختلف مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران در دو حالت شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های اصلاح شده و واقعی (واحد: تن بر ساعت)..... ۱۰۱
جدول ۴- ۱۵- درصد جامد در نقاط مختلف مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران در دو حالت شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های اصلاح شده و واقعی (واحد: درصد) ۱۰۱

فصل ۱

کلیات

فصل ۱ – کلیات

۱-۱- مقدمه

توسعه‌ی مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی مدارهای خردایش با استفاده از این مدل‌ها، موضوع تحقیق افراد زیادی در صنعت فرآوری مواد معدنی در طول سالیان متمادی بوده است [۱-۵]. بهینه‌سازی مدارهای آسیاکنی نیز با استفاده از شبیه‌سازهای پایا از جمله روش‌هایی است که به صورت گسترده‌ای توسعه پیدا کرده است. مهندسین فرآوری مواد معدنی از این ابزار برای بررسی چگونگی تأثیر متغیرهای عملیاتی فرآیندها، مانند دبی خوراک تازه‌ی ورودی به مدار، درصد جامد ورودی به هر یک از واحدهای موجود در مدار، اندازه‌ی بارخردکننده و میزان قابلیت خردشوندگی کانه بر روی عملکرد مدار خردایش استفاده می‌کنند [۶, ۷]

در استفاده از شبیه‌سازهای تجاری موجود علی‌رغم توانایی‌های مختلف آن‌ها مشکلاتی وجود دارد که نیاز به ساخت و توسعه‌ی شبیه‌سازهای بومی را لازم می‌نماید. از جمله اینکه:

- هر یک از شبیه‌سازهای موجود در صنعت فرآوری مواد معدنی از مدل‌های خاصی برای شبیه‌سازی عملکرد واحدهای موجود استفاده می‌کنند و در صورتی که مدل استفاده شده توسط آن‌ها برای دستگاه خاصی مناسب نباشد، اغلب امکان تغییر مدل وجود ندارد، در حالی که شبیه‌سازهای بومی به دلیل در دست داشتن اصل کدها، امکان تغییر مدل‌ها را دارند.
- شبیه‌سازهای رایگان که اغلب شبیه‌سازهای قدیمی‌تر هستند، دارای محدودیت اجرا در سیستم عامل‌های رایج امروزی می‌باشند و یا اینکه با امکانات گرافیکی امروز، آسان کاربرد[1] محسوب نمی‌شوند.
- اغلب این شبیه‌سازها به صورت رایگان در اختیار مهندسین فرآوری مواد معدنی کشور قرار ندارند و انواع تواناتر آن‌ها با شرایط تحریم و قیمت ارز غیر قابل تهیه و یا بسیار پر هزینه‌اند.

1- User friendly

- استفاده‌ی کامل و صحیح از شبیه‌سازهای تجاری، نیاز به داشتن دانش کافی از مدل‌های مورد استفاده در آن‌ها و چگونگی به‌دست‌آوردن پارامترهای صحیح برای مدل‌هاست. کسب چنین دانشی از مسیر توسعه‌ی شبیه‌سازهای بومی به راحتی امکان‌پذیر است.

با عنایت به این نیاز، در این پروژه طراحی یک شبیه‌ساز اختصاصی برای مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران تعریف گردید.

۱-۲- اهداف پایان‌نامه

از مهم‌ترین اهداف این پروژه پس از طراحی شبیه‌ساز اختصاصی مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران، کالیبره کردن آن برای مدار خردایش مذکور و نیز عدم استفاده از هر گونه نرم‌افزار جانبی در محاسبه‌ی داده‌های اولیه‌ی ورودی شبیه‌ساز است و در موارد نیاز، شبیه‌سازهای جانبی برای محاسبه‌ی داده‌ها و پارامترهای مدار مورد نظر کدنویسی خواهند شد. از دیگر اهداف پروژه، طراحی شبیه‌ساز به گونه‌ای است که به راحتی بتواند برای هر مدار خردایش دیگری با چینشی متفاوت از چینش مدار مورد مطالعه، کالیبره شده و مورد استفاده قرار گیرد. شبیه‌ساز اختصاصی مدار خردایش کارخانه‌ی فرآوری طلای زرشوران در محیط نرم‌افزار *MATLAB* کدنویسی شده و سپس با ایجاد یک پوسته‌ی گرافیکی مناسب و دارای کاربری بسیار ساده و راحت، به صورت یک نرم‌افزار مستقل که قابلیت اجرا در سیستم عامل‌های رایج امروزی را دارا می‌باشد، تبدیل و در اختیار کاربران قرار خواهد گرفت. به علاوه، با توجه به این موضوع که در پایان‌نامه‌ی دیگری به موازات این پایان‌نامه، تلفیق داده‌های[1] حاصل از نمونه‌برداری بر روی همین مدار انجام شده است و داده‌های اصلاح شده جهت کالیبره کردن مدل‌ها در دسترس خواهد بود، مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی در دو حالت کالیبره شدن مدل‌ها با داده‌های اصلاح شده و نشده، یکی از اهداف این پایان‌نامه خواهد بود.

1-Data reconciliation