



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی معدن  
گرایش فرآوری مواد معدنی

عنوان:

# ارزیابی عملکرد مدار فلو تاسیون ستونی کارخانه زغال شویی پروده طبس

استاد راهنما:

دکتر رضا دهقان

اساتید مشاور:

دکتر علی دهقانی

مهندس مسعود نوری

تهیه و تنظیم:

محسن دهقان چناری


مهر ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ




تقدیم به

پدر و مادر مهربانم



خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیصم ساخته تا در سایه  
درخت پر بار وجودشان بیایم، و از ریشه آنها شاخ و برگ کیرم و در سایه وجودشان در  
راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر  
سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود پس از پروردگار، مایه  
هستی ام بودند، دستم را گرفتند، و راه رفتن را در این وادی زندگی پر فراز و نشیب  
آموختند. آموزگارانمی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند...



## شکر و قدردانی:

پاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی میان، نشید و به طریق علم و دانش را بنمونان شد و به هم نشینی رحروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیان ساخت.

از خانواده عزیزم که از کودکی، شور دانش و لذت کشف و جستجو را در من بیدار کردند، استقامت در تلاش را به من آموختند و در تمام این سال ها با فراهم کردن آرایش فکری و آسایش روحی، دشواری های بسیاری را بر من آسان نمودند، با تمام وجود قدردانم.

به مصداق «من لم یسکر المخلوق لم یسکر الخالق» از استاد فریخته و فرزانه جناب آقای دکتر دهقان یسکانی که در این مسیر پر فراز و نشیب سخط ای از راهبانی، پشتیبانی و تشویق من دریغ نکردند، کمال تقدیر و شکر را داشته باشم.

بچنین از راهبانی ها و مشاوره های اساتید ارجمند آقایان دکتر دهقانی و مهندس نوری که با نظرات مفیدشان در این پژوهش کمک موثری به من نمودند، بسیار سپاسگزارم.

در پایان از همکاری شرکت زغال سنگ پروده طبس و کلیه کسانی که مراد این راه حمایت کردند، نهایت شکر و قدردانی را دارم.

## چکیده

کارخانه زغالشویی پروده طبس در سال ۱۳۸۷ به منظور تولید ۷۵۰ هزار تن در سال زغال سنگ تمیز حاوی خاکستر ۱۱٪ راه اندازی شد. ظرفیت خوراک این کارخانه ۱/۵ میلیون تن در سال با درصد خاکستر حدود ۴۴٪ بوده است. هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی و بهینه سازی پارامترهای مؤثر بر عملکرد سلول های فلوتاسیون ستونی کارخانه زغال شویی پروده طبس بود. برای رسیدن به این هدف، مطالعات این تحقیق در ۴ بخش برنامه ریزی گردید. در بخش اول، با تهیه نمونه های معرف از جریان های مختلف اطراف سلول های فلوتاسیون، عملکرد ستون ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در بخش دوم، بهینه سازی پارامترهای عملیاتی سلول های ستونی، شامل دبی هوای اسپارجرها، عمق ناحیه کف، دبی جریان آب شستشو، غلظت کلکتور و کف ساز، و دبی حجمی جریان خوراک در دستور کار قرار گرفت و میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای مذکور تحلیل شد. در بخش سوم به منظور بررسی حداکثر راندمان قابل دستیابی برای شرایط حاضر در فرآیند فلوتاسیون، آزمایش های شستشوپذیری (آنالیز رهایی معکوس و آنالیز درختی) در مقیاس آزمایشگاهی بر روی نمونه های معرف حاصل از دو نوع خوراک کارخانه انجام شد. در بخش پایانی به منظور مقایسه میزان تأثیرات ابعاد ذرات، درصد جامد، غلظت کلکتور و کف ساز برای شرایط حاضر در ستون های فلوتاسیون، طرح آماری شامل ۲<sup>۴</sup> آزمایش سینتیکی فاکتوریل کامل تهیه و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد و پس از تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزارهای Design Expert 8 و Minitab 16، میزان تأثیر ۴ فاکتور مذکور بر روی ثابت سینتیک شناورسازی مواد قابل احتراق و دیگر پاسخ های فرآیند فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفت.

بر اساس بخشی از نتایج این مطالعات، راندمان فعلی مدار فلوتاسیون کارخانه زغال شویی پروده، در مورد خوراک معادن یک و مرکزی، ۲۳٪ با خاکستر کنسانتره ۸،۱٪ و در مورد خوراک نگین و معدن جو، ۳۳٪ با خاکستر کنسانتره ۹،۶٪ بدست آمد که در مقایسه با راندمان پیش بینی شده در طراحی (۵۴٪) بسیار کمتر هستند. دبی جریان هوا به عنوان فاکتور با بیشترین تأثیر بر راندمان زغال سنگ تمیز ستون های B و C شناخته شد. در مطالعات بهینه سازی پارامترهای عملیاتی ستون ها، راندمان ستون ها به میزان حدود ۱۴٪ افزایش یافت. در طراحی آماری آزمایش های سینتیک فلوتاسیون، ابعاد ذرات خوراک به عنوان مؤثرترین عامل بر روی ثابت سینتیک مواد قابل احتراق شناخته شد و به ترتیب پارامترهای درصد جامد، غلظت کف ساز و غلظت کلکتور در مرتبه های بعدی تأثیرگذاری قرار گرفتند.

## واژه های کلیدی:

فلوتاسیون ستونی، زغال سنگ پروده، ارزیابی عملکرد، بهینه سازی، شستشوپذیری، طراحی آماری آزمایش ها، سینتیک

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
V	چکیده
X	فهرست جداول
XIII	فهرست شکل‌ها
۱	مقدمه
۳	فصل اول: کلیات
۴	۱-۱- روش‌های فرآوری زغال سنگ
۷	۲-۱- تئوری فلوتاسیون
۹	۳-۱- فلوتاسیون زغال سنگ
۱۱	۴-۱- مراحل شناورسازی
۱۲	۵-۱- انتخابی بودن در فلوتاسیون
۱۳	۶-۱- دنباله‌روی
۱۴	۷-۱- زیرفرآیندها در فلوتاسیون زغال سنگ
۱۶	۸-۱- خاکستر زغال سنگ از دیدگاه فلوتاسیون
۱۷	۹-۱- تأثیر گوگرد در مصرف زغال سنگ
۱۸	۱۰-۱- خواص ذاتی آبرانی زغال سنگ
۱۹	۱۱-۱- مواد شیمیایی مورد مصرف در فلوتاسیون زغال سنگ
۱۹	۱-۱۱-۱- کلکتورها و کمک کلکتورها
۲۱	۲-۱۱-۱- کف‌سازها
۲۲	۳-۱۱-۱- تنظیم‌کننده‌ها
۲۲	۱-۳-۱۱-۱- بازداشت‌کننده‌ها
۲۳	۲-۳-۱۱-۱- متفرق‌کننده‌ها
۲۴	۳-۳-۱۱-۱- فعال‌کننده‌ها
۲۴	۴-۳-۱۱-۱- تنظیم‌کننده‌های pH
۲۴	۱۲-۱- عوامل مؤثر در فلوتاسیون زغال سنگ
۲۴	۱-۱۲-۱- تأثیر ابعاد ذرات
۲۶	۱-۱۲-۱- تأثیر ابعاد ذرات بر روی سرعت فلوتاسیون
۲۷	۲-۱-۱۲-۱- تأثیر ابعاد ذرات بر روی دنباله‌روی
۲۷	۳-۱-۱۲-۱- تأثیر ابعاد ذرات بر روی مصرف مواد شیمیایی
۲۹	۴-۱-۱۲-۱- تأثیر ابعاد ذرات بر روی اتصال حباب- ذره
۲۹	۲-۱۲-۱- اکسایش و درجه زغال‌شدگی
۳۰	۳-۱۲-۱- سرعت فلوتاسیون
۳۰	۴-۱۲-۱- PH
۳۱	۵-۱۲-۱- درصد جامد
۳۲	۶-۱۲-۱- تأثیر مواد شیمیایی
۳۳	۱۳-۱- انواع ماشین‌های فلوتاسیون

۳۳	..... ماشین‌های مکانیکی	۱-۱۳-۱
۳۴	..... انواع ماشین‌های مکانیکی	۱-۱-۱۳-۱
۳۴	..... ماشین‌های هوایی	۲-۱۳-۱
۳۵	..... انواع ماشین‌های هوایی	۱-۲-۱۳-۱
۳۶	..... ستون‌های فلوتاسیون	۱۴-۱
۳۷	..... طرح کلی و نحوه کار	۱-۱۴-۱
۴۰	..... ستون CoalPro	۲-۱۴-۱
۴۱	..... تفاوت سلول‌های ستونی با مکانیکی	۱۵-۱
۴۳	..... زمان ماند سلول‌های فلوتاسیون	۱۶-۱
۴۷	..... معرفی اصطلاحات رایج در فلوتاسیون ستونی	۱۷-۱
۴۷	..... ماندگی گاز	۱-۱۷-۱
۴۹	..... سیستم پخش هوا (اسپارجر)	۲-۱۷-۱
۵۱	..... سرعت ظاهری گاز	۳-۱۷-۱
۵۱	..... جریان حبابی و آشفته	۴-۱۷-۱
۵۲	..... نرخ سطح ظاهری حباب	۵-۱۷-۱
۵۳	..... آب شستشو	۶-۱۷-۱
۵۴	..... سیستم توزیع آب شستشو	۱-۶-۱۷-۱
۵۴	..... ارتفاع توزیع‌کننده آب شستشو	۲-۶-۱۷-۱
۵۵	..... آب بایاس	۷-۱۷-۱
۵۶	..... جابه‌جایی کف	۸-۱۷-۱
۵۷	..... عمق کف	۹-۱۷-۱
۵۷	..... زمان ماند ناحیه کف و جمع‌آوری	۱۰-۱۷-۱
۵۸	..... برگشتی از کف	۱۱-۱۷-۱
۶۰	..... نرخ حمل مواد جامد	۱۲-۱۷-۱
۶۰	..... احتمال جمع‌آوری	۱۳-۱۷-۱
۶۲	..... فصل دوم: معرفی کارخانه زغال‌شویی پروده طبس	
۶۳	..... ۱-۲- کارخانه زغال‌شویی پروده طبس در یک نگاه	
۶۸	..... ۱-۱-۲- مروری بر عملکرد کارخانه زغال‌شویی پروده طبس در سال ۹۱-۱۳۹۰	
۷۱	..... ۲-۲- مدار فلوتاسیون کارخانه	
۷۴	..... ۱-۲-۲- تغییرات راندمان و بازیابی مدار فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی پروده طبس در سال ۹۱-۱۳۹۰	
۷۶	..... فصل سوم: روش و مراحل تحقیق	
۷۷	..... ۱-۳- مراحل تحقیق	
۷۷	..... ۱-۱-۳- ارزیابی عملکرد مدار فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی پروده طبس	
۸۰	..... ۲-۱-۳- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد ستون‌های فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی پروده طبس	
۸۴	..... ۱-۲-۱-۳- تأثیر نرخ هوا	
۸۵	..... ۲-۲-۱-۳- تأثیر عمق کف	
۸۸	..... ۳-۲-۱-۳- تأثیر آب شستشو	
۸۹	..... ۴-۲-۱-۳- تأثیر غلظت کلکتور	
۹۰	..... ۵-۲-۱-۳- تأثیر غلظت کف‌ساز	

۹۰	..... تأثیر نرخ خوراک‌دهی..... ۳-۱-۲-۶
۹۱	..... تعیین قابلیت شناوری نمونه‌های خوراک کارخانه زغال‌شویی پروده طبس..... ۳-۱-۳
۹۵	..... اهمیت تعیین حد شناورسازی ذرات..... ۳-۱-۳-۱
۹۶	..... شاخص‌های تعیین حد شناورسازی ذرات..... ۳-۱-۳-۲
۹۶	..... ویژگی‌های روش‌های تعیین قابلیت شناوری..... ۳-۱-۳-۳
۹۷	..... روش‌های تعیین قابلیت شناوری ذرات..... ۳-۱-۳-۴
۱۰۴	..... مقایسه روش‌های تعیین قابلیت شناوری ذرات..... ۳-۱-۳-۵
۱۰۶	..... مطالعات سینتیک شناورسازی بر روی نمونه خوراک کارخانه زغال‌شویی پروده طبس..... ۳-۱-۴
۱۱۲	..... امکان‌سنجی اندازه‌گیری توزیع زمان ماند سلول‌های فلوتاسیون ستونی با استفاده از محلول نمک..... ۳-۲
۱۱۴	..... فصل چهارم: نتایج آزمایش‌های انجام شده در مقیاس‌های صنعتی و آزمایشگاهی..... ۳-۴
۱۱۵	..... نتایج ارزیابی عملکرد مدار فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی پروده طبس..... ۴-۱-۱
۱۱۵	..... نتایج ارزیابی عملکرد ستون‌های فلوتاسیون در حالت خوراک‌دهی مدار با نمونه معادن یک و مرکزی..... ۴-۱-۱-۱
۱۱۶	..... توزیع دانه‌بندی نمونه‌ها در جریان‌های اطراف ستون‌ها..... ۴-۱-۱-۱-۱
۱۲۰	..... توزیع خاکستر نمونه‌ها در جریان‌های اطراف ستون‌ها..... ۴-۱-۱-۲
۱۲۳	..... مقایسه راندمان، بازیابی و کارآیی جدایش ستون‌ها..... ۴-۱-۱-۳
۱۲۴	..... نتایج ارزیابی عملکرد ستون‌های فلوتاسیون در حالت خوراک‌دهی مدار با نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۴-۱-۲
۱۲۵	..... توزیع دانه‌بندی نمونه‌ها در جریان‌های اطراف ستون‌ها..... ۴-۱-۲-۱
۱۲۹	..... توزیع خاکستر نمونه‌ها در جریان‌های اطراف ستون‌ها..... ۴-۱-۲-۲
۱۳۱	..... مقایسه راندمان، بازیابی و کارآیی جدایش ستون‌ها..... ۴-۱-۲-۳
۱۳۳	..... بررسی تاثیر نوع خوراک کارخانه بر عملکرد ستون‌ها فلوتاسیون..... ۴-۱-۳
۱۳۳	..... مقایسه توزیع دانه‌بندی نمونه‌ها در جریان‌های اطراف ستون‌ها..... ۴-۱-۳-۱
۱۳۵	..... مقایسه توزیع خاکستر نمونه‌ها در جریان‌های اطراف ستون‌ها..... ۴-۱-۳-۲
۱۴۰	..... مقایسه راندمان، بازیابی و کارآیی جدایش ستون‌ها..... ۴-۱-۳-۳
۱۴۱	..... نتایج بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد ستون‌های فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی پروده طبس..... ۴-۲
۱۴۱	..... بررسی تاثیر دبی جریان هوا..... ۴-۲-۱
۱۴۱	..... تاثیر دبی جریان هوا بر روی عملکرد ستون‌ها..... ۴-۲-۱-۱
۱۴۴	..... تاثیر دبی جریان هوا بر روی دانه‌بندی کنسانتره سلول B..... ۴-۲-۱-۲
۱۴۵	..... بررسی تاثیر عمق ناحیه کف..... ۴-۲-۲
۱۴۸	..... بررسی تاثیر دبی جریان آب شستشو..... ۴-۲-۳
۱۵۲	..... بررسی تاثیر غلظت کلکتور (گازوئیل)..... ۴-۲-۴
۱۵۲	..... تاثیر غلظت کلکتور بر عملکرد ستون‌ها..... ۴-۲-۴-۱
۱۵۵	..... تاثیر غلظت کلکتور بر روی دانه‌بندی کنسانتره ستون‌ها..... ۴-۲-۴-۲
۱۵۶	..... بررسی تاثیر غلظت کف‌ساز (MIBC)..... ۴-۲-۵
۱۵۹	..... بررسی تاثیر دبی حجمی جریان خوراک..... ۴-۲-۶
۱۶۲	..... بررسی میزان تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد ستون‌های فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی پروده طبس..... ۴-۲-۷
۱۶۲	..... مقایسه میزان تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی درصد خاکستر کنسانتره ستون‌ها..... ۴-۲-۷-۱
۱۶۴	..... مقایسه میزان تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی راندمان ستون‌ها..... ۴-۲-۷-۲
۱۶۶	..... مقایسه میزان تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی بازیابی ستون‌ها..... ۴-۲-۷-۳
۱۶۸	..... مقایسه میزان تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی کارآیی جدایش ستون‌ها..... ۴-۲-۷-۴



۱۷۰	۳-۴- نتایج تعیین قابلیت شناوری نمونه‌های خوراک کارخانه زغال‌شویی پروده طبس
۱۷۱	۱-۳-۴- نتایج شستشوپذیری نمونه معادن یک و مرکزی
۱۷۱	۱-۱-۳-۴- روش آنالیز رهایی معکوس
۱۷۲	۲-۱-۳-۴- روش آنالیز درختی
۱۷۳	۲-۳-۴- نتایج شستشوپذیری نمونه معادن نگین و معدنچو
۱۷۳	۱-۲-۳-۴- روش آنالیز رهایی معکوس
۱۷۴	۲-۲-۳-۴- روش آنالیز درختی
۱۷۶	۳-۳-۴- مقایسه نتایج شستشوپذیری نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو
۱۷۶	۱-۳-۳-۴- مقایسه نتایج روش آنالیز رهایی معکوس
۱۷۷	۲-۳-۳-۴- مقایسه نتایج روش آنالیز درختی
۱۷۸	۴-۴- نتایج مطالعات سینتیک شناورسازی بر روی نمونه خوراک کارخانه زغال‌شویی پروده طبس
۱۸۱	۱-۴-۴- ثابت سینتیک مواد قابل احتراق
۱۸۸	۲-۴-۴- ثابت سرعت اولیه
۱۹۴	۳-۴-۴- درصد خاکستر زغال تمیز
۲۰۰	۴-۴-۴- راندمان زغال تمیز
۲۰۷	۵-۴-۴- بازیابی زغال تمیز
۲۱۴	۶-۴-۴- شاخص انتخابی بودن
۲۲۱	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۲۲۲	۱-۵- نتیجه‌گیری
۲۲۵	۲-۵- پیشنهادها
۲۲۷	پیوست‌ها
۲۲۸	الف: اطلاعات بخش‌های مختلف فرآیند کارخانه زغال‌شویی پروده طبس بر اساس داده‌های طراحی
۲۳۲	ب: روش استاندارد آنالیز خاکستر
۲۳۵	فهرست منابع و مآخذ

## فهرست جدول‌ها

### عنوان

### صفحه

فصل اول.....	۳
جدول ۱-۱- ترکیب کانی‌شناختی خاکستر زغال‌سنگ.....	۱۷
جدول ۲-۱- مواردی از سلول‌های هوایی صنعتی در کارخانه‌های زغال‌شویی آمریکا.....	۳۹
فصل دوم.....	۶۲
جدول ۱-۲- توزیع دانه‌بندی خوراک ورودی به کارخانه زغال‌شویی پروده طبس در زمان طراحی.....	۶۸
جدول ۲-۲- مشخصات عملکرد کارخانه زغال‌شویی پروده طبس در سال ۹۱-۱۳۹۰.....	۶۹
جدول ۳-۲- تغییرات راندمان و بازیابی مدار فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی پروده طبس در سال ۹۱-۱۳۹۰.....	۷۵
فصل سوم.....	۷۶
جدول ۱-۳- برخی از روابط مربوط به کارآیی جدایش.....	۸۱
جدول ۲-۳- سطح میانی پارامترهای عملیاتی ستون‌های کارخانه زغال‌شویی پروده طبس.....	۸۳
جدول ۳-۳- سطوح پارامترهای آزمایش‌های سینتیک با طراحی ۲ <sup>۴</sup> فاکتوریل کامل.....	۱۰۷
جدول ۴-۳- زمان‌های کف‌گیری آزمایش‌های سینتیک طراحی آزمایش‌ها.....	۱۰۷
جدول ۵-۳- بعضی از مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون ناپیوسته.....	۱۱۰
جدول ۶-۳- مقدار نمک NaCl اضافه شده به نمونه‌های پالپ ورودی به ستون‌های فلوتاسیون.....	۱۱۳
فصل چهارم.....	۱۱۴
جدول ۱-۴- شرایط عملیاتی هنگام نمونه‌برداری از سلول‌های فلوتاسیون ستونی TCPD با خوراک معادن یک و مرکزی.....	۱۱۵
جدول ۲-۴- پارامترهای محاسباتی با توجه به شرایط نمونه‌برداری از خوراک معادن یک و مرکزی.....	۱۱۶
جدول ۳-۴- توزیع دانه‌بندی خوراک ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی.....	۱۱۶
جدول ۴-۴- توزیع دانه‌بندی کنسانتره ستون‌ها مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی.....	۱۱۹
جدول ۵-۴- توزیع دانه‌بندی باطله ستون‌ها مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی.....	۱۲۰
جدول ۶-۴- توزیع خاکستر خوراک ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی.....	۱۲۱
جدول ۷-۴- توزیع خاکستر کنسانتره ستون‌ها مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی.....	۱۲۱
جدول ۸-۴- مقایسه راندمان و بازیابی بخش‌های مختلف ابعادی ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی.....	۱۲۲
جدول ۹-۴- مقایسه مشخصات فرآیند ستون‌های فلوتاسیون مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی.....	۱۲۴
جدول ۱۰-۴- شرایط عملیاتی هنگام نمونه‌برداری از سلول‌های فلوتاسیون ستونی TCPD با خوراک معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۲۵
جدول ۱۱-۴- پارامترهای محاسباتی با توجه به شرایط نمونه‌برداری از خوراک معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۲۵
جدول ۱۲-۴- توزیع دانه‌بندی خوراک ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۲۶
جدول ۱۳-۴- توزیع دانه‌بندی کنسانتره ستون‌ها مربوط به نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۲۷
جدول ۱۴-۴- توزیع دانه‌بندی باطله ستون‌ها مربوط به نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۲۸
جدول ۱۵-۴- توزیع خاکستر خوراک ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۲۹
جدول ۱۶-۴- توزیع خاکستر کنسانتره ستون‌ها مربوط به نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۲۹
جدول ۱۷-۴- مقایسه راندمان و بازیابی بخش‌های مختلف ابعادی ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۳۰
جدول ۱۸-۴- مقایسه مشخصات فرآیند ستون‌های فلوتاسیون مربوط به نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۳۲
جدول ۱۹-۴- مقایسه توزیع دانه‌بندی خوراک و کنسانتره سلول B نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۳۳
جدول ۲۰-۴- مقایسه توزیع دانه‌بندی خوراک و کنسانتره سلول C نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدن‌جو.....	۱۳۴

- جدول ۴-۲۱- مقایسه توزیع خاکستر خوراک و کنسانتره سلول B نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۱۳۶
- جدول ۴-۲۲- مقایسه توزیع خاکستر خوراک و کنسانتره سلول C نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۱۳۷
- جدول ۴-۲۳- مقایسه راندمان و بازیابی بخش‌های مختلف ابعادی سلول B نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۱۳۸
- جدول ۴-۲۴- مقایسه راندمان و بازیابی بخش‌های مختلف ابعادی سلول C نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۱۳۹
- جدول ۴-۲۵- مقایسه شاخص‌های عملکرد ستون‌های B و C با دو نوع خوراک متفاوت..... ۱۴۰
- جدول ۴-۲۶- تأثیر دبی جریان هوا بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۴۲
- جدول ۴-۲۷- تأثیر دبی جریان هوا بر روی عملکرد ستون‌های B و C..... ۱۴۲
- جدول ۴-۲۸-  $d_{80}$  خوراک سلول B مربوط به بررسی تأثیر دبی جریان هوا بر دانه‌بندی زغال تمیز..... ۱۴۴
- جدول ۴-۲۹- تأثیر دبی جریان هوا بر روی دانه‌بندی کنسانتره سلول B..... ۱۴۵
- جدول ۴-۳۰- تأثیر عمق ناحیه کف بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۴۶
- جدول ۴-۳۱- تأثیر عمق ناحیه کف بر روی عملکرد ستون‌های B و C..... ۱۴۶
- جدول ۴-۳۲- تأثیر دبی جریان آب شستشو بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۴۸
- جدول ۴-۳۳- تأثیر دبی جریان آب شستشو بر روی عملکرد ستون‌های B و C..... ۱۴۹
- جدول ۴-۳۴- تأثیر غلظت کلکتور بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۵۲
- جدول ۴-۳۵- تأثیر غلظت کلکتور بر روی عملکرد ستون‌های B و C..... ۱۵۲
- جدول ۴-۳۶-  $d_{80}$  خوراک سلول B مربوط به بررسی تأثیر غلظت کلکتور بر دانه‌بندی زغال تمیز..... ۱۵۳
- جدول ۴-۳۷- تأثیر غلظت کلکتور بر روی دانه‌بندی کنسانتره سلول B..... ۱۵۵
- جدول ۴-۳۸- تأثیر غلظت کف‌ساز بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۵۶
- جدول ۴-۳۹- تأثیر غلظت کف‌ساز بر روی عملکرد ستون‌های B و C..... ۱۵۷
- جدول ۴-۴۰- تأثیر دبی حجمی جریان خوراک بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۵۹
- جدول ۴-۴۱- تأثیر دبی حجمی جریان خوراک بر روی عملکرد ستون‌های B و C..... ۱۵۹
- جدول ۴-۴۲- میزان و نحوه تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی درصد خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۶۳
- جدول ۴-۴۳- میزان و نحوه تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی راندمان ستون‌های B و C..... ۱۶۵
- جدول ۴-۴۴- میزان و نحوه تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی بازیابی ستون‌های B و C..... ۱۶۶
- جدول ۴-۴۵- میزان و نحوه تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی کارایی جدایش ستون‌های B و C..... ۱۶۸
- جدول ۴-۴۶- نتایج حاصل از آزمایش آنالیز رهایی معکوس بر روی نمونه معادن یک و مرکزی..... ۱۷۱
- جدول ۴-۴۷- نتایج حاصل از آزمایش آنالیز درختی بر روی نمونه معادن یک و مرکزی..... ۱۷۲
- جدول ۴-۴۸- نتایج حاصل از آزمایش آنالیز رهایی معکوس بر روی نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۱۷۴
- جدول ۴-۴۹- نتایج حاصل از آزمایش آنالیز درختی بر روی نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۱۷۵
- جدول ۴-۵۰- مقایسه نتایج آنالیز رهایی معکوس نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۱۷۷
- جدول ۴-۵۱- مقایسه نتایج آنالیز درختی نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معدن نگین و معدنچو..... ۱۷۸
- جدول ۴-۵۲- مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی حاصل از اولین آزمایش سینتیک طراحی آزمایش‌ها..... ۱۷۹
- جدول ۴-۵۳- شرایط عملیاتی و نتایج آزمایش‌های سینتیک با طراحی آماری فاکتوریل کامل (۲<sup>۴</sup>)..... ۱۸۱
- جدول ۴-۵۴- تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس بر روی ثابت سینتیک مواد قابل احتراق..... ۱۸۲
- جدول ۴-۵۵- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ثابت سینتیک مواد قابل احتراق..... ۱۸۳
- جدول ۴-۵۶- شرایط لازم برای دستیابی به حداکثر ثابت سینتیک مواد قابل احتراق..... ۱۸۸
- جدول ۴-۵۷- سایر پاسخ‌های فرآیند در حالت دستیابی به حداکثر ثابت سینتیک مواد قابل احتراق..... ۱۸۸
- جدول ۴-۵۸- تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس بر روی ثابت سرعت اولیه..... ۱۸۹
- جدول ۴-۵۹- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ثابت سرعت اولیه..... ۱۹۰

- جدول ۴-۶۰- شرایط لازم برای دستیابی به حداکثر ثابت سرعت اولیه ..... ۱۹۴
- جدول ۴-۶۱- سایر پاسخ‌های فرآیند در حالت دستیابی به حداکثر ثابت سرعت اولیه ..... ۱۹۴
- جدول ۴-۶۲- تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس بر روی درصد خاکستر زغال تمیز ..... ۱۹۵
- جدول ۴-۶۳- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده درصد خاکستر زغال تمیز ..... ۱۹۶
- جدول ۴-۶۴- شرایط لازم برای دستیابی به حداقل درصد خاکستر زغال تمیز ..... ۲۰۰
- جدول ۴-۶۵- سایر پاسخ‌های فرآیند در حالت دستیابی به حداقل درصد خاکستر زغال تمیز ..... ۲۰۰
- جدول ۴-۶۶- تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس بر روی راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۱
- جدول ۴-۶۷- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۲
- جدول ۴-۶۸- شرایط لازم برای دستیابی به حداکثر راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۶
- جدول ۴-۶۹- سایر پاسخ‌های فرآیند در حالت دستیابی به حداکثر راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۷
- جدول ۴-۷۰- تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس بر روی بازیابی زغال تمیز ..... ۲۰۷
- جدول ۴-۷۱- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده بازیابی زغال تمیز ..... ۲۰۹
- جدول ۴-۷۲- شرایط لازم برای دستیابی به حداکثر بازیابی زغال تمیز ..... ۲۱۳
- جدول ۴-۷۳- سایر پاسخ‌های فرآیند در حالت دستیابی به حداکثر بازیابی زغال تمیز ..... ۲۱۴
- جدول ۴-۷۴- تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس بر روی شاخص انتخابی بودن ..... ۲۱۴
- جدول ۴-۷۵- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده شاخص انتخابی بودن ..... ۲۱۶
- جدول ۴-۷۶- شرایط لازم برای دستیابی به حداکثر شاخص انتخابی بودن ..... ۲۱۸
- جدول ۴-۷۷- سایر پاسخ‌های فرآیند در حالت دستیابی به حداکثر شاخص انتخابی بودن ..... ۲۲۰

## فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳	فصل اول
۵	شکل ۱-۱- روش‌های معمول فرآوری زغال‌سنگ در محدوده‌های ابعادی مختلف از گذشته تا به امروز
۸	شکل ۲-۱- قاعده کلی فلوتاسیون انتخابی
۹	شکل ۳-۱- مدل شناورسازی دو مرحله‌ای
۱۳	شکل ۴-۱- جدایش ذرات آبران از آبدوست در فلوتاسیون
۱۵	شکل ۵-۱- معرفی شماتیکی از زیرفرآیندهای مختلف در فلوتاسیون زغال‌سنگ
۱۶	شکل ۶-۱- پارامترهای مؤثر در فلوتاسیون
۱۸	شکل ۷-۱- تغییرات زاویه تماس نسبت به تغییرات درصد کربن موجود در زغال‌سنگ
۲۳	شکل ۸-۱- تأثیر رس و متفرق‌کننده (اورتوفسفات) بر روی قابلیت شناوری سطح زغال‌سنگ در محلول آبی
۲۸	شکل ۹-۱- تأثیر درصد پوشش سطحی کلکتور و ابعاد ذرات بر قابلیت شناوری آنها
۳۱	شکل ۱۰-۱- تأثیر PH در فلوتاسیون زغال‌سنگ
۳۸	شکل ۱۱-۱- شمای کلی یک ستون فلوتاسیون
۴۰	شکل ۱۲-۱- طرح کلی ستون CoalPro
۴۴	شکل ۱۳-۱- توزیع زمان‌های ماند برای جریان‌های پیستونی و اختلاط کامل
۴۵	شکل ۱۴-۱- دو ترکیب متداول الگوهای ایده‌آل برای مدل‌سازی رآکتورهای واقعی
۴۸	شکل ۱۵-۱- روش‌های اندازه‌گیری ماندگی گاز
۵۰	شکل ۱۶-۱- مقایسه آزمایشگاهی سه اسپارجر معروف ستون
۵۲	شکل ۱۷-۱- ماندگی گاز به صورت تابعی از نرخ گازدهی
۵۹	شکل ۱۸-۱- وابستگی کلی بازیابی ناحیه کف ( $R_F$ ) و برگشتی از کف به ابعاد ذره، و تأثیر افزایش $d_c$ و $H_F$
۶۲	فصل دوم
۶۳	شکل ۱-۲- سنگ‌شکن Rotary Breaker
۶۴	شکل ۲-۲- دستگاه Tri Flo 700
۶۴	شکل ۳-۲- سنگ‌شکن Cage Mill
۶۵	شکل ۴-۲- دستگاه Tri Flo 500
۶۵	شکل ۵-۲- دستگاه سانتریفیوژ
۶۶	شکل ۶-۲- دستگاه فیلترپرس
۶۷	شکل ۷-۲- فلوشیت فرآوری کارخانه زغال‌شویی پروده طبس
۶۹	شکل ۸-۲- منحنی تغییرات خاکستر خوراک ورودی به TCPP در اردیبهشت سال ۱۳۹۱
۷۰	شکل ۹-۲- منحنی‌های تغییرات خاکستر خوراک و کنسانتره تولیدی TCPP در سال ۹۱-۱۳۹۰
۷۰	شکل ۱۰-۲- منحنی تغییرات تناژ کنسانتره تولیدی TCPP در سال ۹۱-۱۳۹۰
۷۰	شکل ۱۱-۲- منحنی‌های تغییرات راندمان و بازیابی TCPP در سال ۹۱-۱۳۹۰
۷۲	شکل ۱۲-۲- نمایی از توزیع‌کننده مدار فلوتاسیون TCPP، دید از بالا (الف) دید افقی (ب)
۷۴	شکل ۱۳-۲- چیدمان کلی سلول‌های فلوتاسیون ستونی در TCPP
۷۴	شکل ۱۴-۲- نمایی از سطح و سیستم توزیع آب و هوای سلول فلوتاسیون ستونی در TCPP
۷۵	شکل ۱۵-۲- منحنی‌های تغییرات راندمان و بازیابی مدار فلوتاسیون TCPP در سال ۹۱-۱۳۹۰

فصل سوم	۷۶
شکل ۱-۳- نمونه‌گیرهای نصب شده بر روی جریان‌های خوراک ستون‌های B و C	۷۸
شکل ۲-۳- نمونه‌گیرهای نصب شده بر روی جریان باطله ستون‌ها	۷۸
شکل ۳-۳- نمایی از ماشین خود هواده دنور مدل D12 در حال کار	۹۳
شکل ۴-۳- نمودار طرح کلی روش آنالیز رهایی زمان‌دار	۹۹
شکل ۵-۳- نمودار طرح کلی روش آنالیز رهایی ساده شده	۱۰۱
شکل ۶-۳- نمودار طرح کلی روش آنالیز درختی	۱۰۳
شکل ۷-۳- نمودار طرح کلی روش آنالیز رهایی معکوس	۱۰۵
شکل ۸-۳- منحنی زمان- بازیابی برای آزمایش فلوتاسیون ناپیوسته	۱۰۹
شکل ۹-۳- منحنی $\ln(1-(R/R_{\infty}))$ در مقابل زمان $t$	۱۰۹
شکل ۱۰-۳- هدایت‌سنج الکتریکی مورد استفاده در تعیین هدایت الکتریکی نمونه‌های پالپ ورودی به ستون‌های فلوتاسیون	۱۱۲
فصل چهارم	۱۱۴
شکل ۱-۴- مقایسه سطح سرد کار کرده (الف) با حالت استفاده نشده (ب)	۱۱۷
شکل ۲-۴- منحنی‌های توزیع دانه‌بندی خوراک ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی	۱۱۸
شکل ۳-۴- منحنی‌های توزیع دانه‌بندی کنسانتره ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی	۱۱۹
شکل ۴-۴- منحنی‌های توزیع دانه‌بندی باطله ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی	۱۲۰
شکل ۵-۴- منحنی‌های توزیع خاکستر خوراک و کنسانتره ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی	۱۲۲
شکل ۶-۴- منحنی‌های راندمان و بازیابی بخش‌های مختلف ابعادی ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی	۱۲۳
شکل ۷-۴- مقایسه عملکرد ستون‌های فلوتاسیون مربوط به نمونه معادن یک و مرکزی	۱۲۴
شکل ۸-۴- منحنی‌های توزیع دانه‌بندی خوراک ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۲۶
شکل ۹-۴- منحنی‌های توزیع دانه‌بندی کنسانتره ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۲۷
شکل ۱۰-۴- منحنی‌های توزیع دانه‌بندی باطله ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۲۸
شکل ۱۱-۴- مقایسه منحنی‌های توزیع خاکستر خوراک و کنسانتره ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۰
شکل ۱۲-۴- منحنی‌های راندمان و بازیابی بخش‌های مختلف ابعادی ستون‌های B و C مربوط به نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۱
شکل ۱۳-۴- مقایسه عملکرد ستون‌های فلوتاسیون مربوط به نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۲
شکل ۱۴-۴- مقایسه منحنی‌های توزیع دانه‌بندی خوراک و کنسانتره سلول B نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۴
شکل ۱۵-۴- مقایسه منحنی‌های توزیع دانه‌بندی خوراک و کنسانتره سلول C نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۵
شکل ۱۶-۴- مقایسه منحنی‌های توزیع خاکستر خوراک و کنسانتره سلول B نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۶
شکل ۱۷-۴- مقایسه منحنی‌های توزیع خاکستر خوراک و کنسانتره سلول C نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۷
شکل ۱۸-۴- مقایسه منحنی‌های راندمان و بازیابی بخش‌های مختلف ابعادی سلول B نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۸
شکل ۱۹-۴- مقایسه منحنی‌های راندمان و بازیابی بخش‌های مختلف ابعادی سلول C نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۳۹
شکل ۲۰-۴- مقایسه شاخص‌های عملکرد سلول B در حالت خوراک‌دهی با نمونه معادن یک و مرکزی با حالت خوراک‌دهی با نمونه معادن نگین و معدنچو	۱۴۰

- شکل ۴-۲۱- مقایسه شاخص‌های عملکرد سلول C در حالت خوراک‌دهی با نمونه معادن یک و مرکزی با حالت خوراک‌دهی با نمونه معادن نگین و معدنچو..... ۱۴۱
- شکل ۴-۲۲- منحنی‌های تأثیر دبی جریان هوا بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۴۳
- شکل ۴-۲۳- منحنی‌های تأثیر دبی جریان هوا بر روی راندمان ستون‌های B و C..... ۱۴۳
- شکل ۴-۲۴- منحنی‌های تأثیر دبی جریان هوا بر روی بازیابی ستون‌های B و C..... ۱۴۳
- شکل ۴-۲۵- منحنی‌های تأثیر دبی جریان هوا بر روی کارآیی جدایش ستون‌های B و C..... ۱۴۴
- شکل ۴-۲۶- منحنی‌های تأثیر دبی جریان هوا بر روی دانه‌بندی کنسانتره سلول B..... ۱۴۵
- شکل ۴-۲۷- منحنی‌های تأثیر عمق ناحیه کف بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۴۷
- شکل ۴-۲۸- منحنی‌های تأثیر عمق ناحیه کف بر روی راندمان ستون‌های B و C..... ۱۴۷
- شکل ۴-۲۹- منحنی‌های تأثیر عمق ناحیه کف بر روی بازیابی ستون‌های B و C..... ۱۴۷
- شکل ۴-۳۰- منحنی‌های تأثیر عمق ناحیه کف بر روی کارآیی جدایش ستون‌های B و C..... ۱۴۸
- شکل ۴-۳۱- منحنی‌های تأثیر دبی جریان آب شستشو بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۴۹
- شکل ۴-۳۲- منحنی‌های تأثیر دبی جریان آب شستشو بر روی راندمان ستون‌های B و C..... ۱۵۰
- شکل ۴-۳۳- منحنی‌های تأثیر دبی جریان آب شستشو بر روی بازیابی ستون‌های B و C..... ۱۵۰
- شکل ۴-۳۴- منحنی‌های تأثیر دبی جریان آب شستشو بر روی کارآیی جدایش ستون‌های B و C..... ۱۵۰
- شکل ۴-۳۵- سیستم توزیع آب شستشوی سلول C در کارخانه زغال‌شویی پروده طبس..... ۱۵۱
- شکل ۴-۳۶- سیستم توزیع یکنواخت آب شستشوی یک سلول ستونی..... ۱۵۲
- شکل ۴-۳۷- منحنی‌های تأثیر غلظت کلکتور بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۵۳
- شکل ۴-۳۸- منحنی‌های تأثیر غلظت کلکتور بر روی راندمان ستون‌های B و C..... ۱۵۴
- شکل ۴-۳۹- منحنی‌های تأثیر غلظت کلکتور بر روی بازیابی ستون‌های B و C..... ۱۵۴
- شکل ۴-۴۰- منحنی‌های تأثیر غلظت کلکتور بر روی کارآیی جدایش ستون‌های B و C..... ۱۵۴
- شکل ۴-۴۱- منحنی‌های تأثیر غلظت کلکتور بر روی دانه‌بندی کنسانتره سلول B..... ۱۵۶
- شکل ۴-۴۲- منحنی‌های تأثیر غلظت کف‌ساز بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۵۷
- شکل ۴-۴۳- منحنی‌های تأثیر غلظت کف‌ساز بر روی راندمان ستون‌های B و C..... ۱۵۸
- شکل ۴-۴۴- منحنی‌های تأثیر غلظت کف‌ساز بر روی بازیابی ستون‌های B و C..... ۱۵۸
- شکل ۴-۴۵- منحنی‌های تأثیر غلظت کف‌ساز بر روی کارآیی جدایش ستون‌های B و C..... ۱۵۸
- شکل ۴-۴۶- منحنی‌های تأثیر دبی حجمی جریان خوراک بر روی خاکستر کنسانتره ستون‌های B و C..... ۱۶۰
- شکل ۴-۴۷- منحنی‌های تأثیر دبی حجمی جریان خوراک بر روی راندمان ستون‌های B و C..... ۱۶۰
- شکل ۴-۴۸- منحنی‌های تأثیر دبی حجمی جریان خوراک بر روی بازیابی ستون‌های B و C..... ۱۶۱
- شکل ۴-۴۹- منحنی‌های تأثیر دبی حجمی جریان خوراک بر روی کارآیی جدایش ستون‌های B و C..... ۱۶۱
- شکل ۴-۵۰- منحنی‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی درصد خاکستر کنسانتره سلول B..... ۱۶۳
- شکل ۴-۵۱- منحنی‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی درصد خاکستر کنسانتره سلول C..... ۱۶۴
- شکل ۴-۵۲- منحنی‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی راندمان سلول B..... ۱۶۵
- شکل ۴-۵۳- منحنی‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی راندمان سلول C..... ۱۶۶
- شکل ۴-۵۴- منحنی‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی بازیابی سلول B..... ۱۶۷
- شکل ۴-۵۵- منحنی‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی بازیابی سلول C..... ۱۶۸
- شکل ۴-۵۶- منحنی‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی کارآیی جدایش سلول B..... ۱۶۹
- شکل ۴-۵۷- منحنی‌های تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی کارآیی جدایش سلول C..... ۱۷۰
- شکل ۴-۵۸- منحنی‌های قابلیت شناوری بدست آمده از روش آنالیز رهایی معکوس بر روی نمونه معادن یک و مرکزی..... ۱۷۱

- شکل ۴-۵۹- منحنی‌های قابلیت شناوری بدست آمده از روش آنالیز درختی بر روی نمونه معادن یک و مرکزی ..... ۱۷۲
- شکل ۴-۶۰- مقایسه منحنی‌های قابلیت شناوری بدست آمده از آنالیز رهایی و آنالیز درختی نمونه معادن یک و مرکزی ..... ۱۷۳
- شکل ۴-۶۱- منحنی‌های قابلیت شناوری بدست آمده از روش آنالیز رهایی معکوس بر روی نمونه معادن نگین و معدنچو ..... ۱۷۴
- شکل ۴-۶۲- منحنی‌های قابلیت شناوری بدست آمده از روش آنالیز درختی بر روی نمونه معادن نگین و معدنچو ..... ۱۷۵
- شکل ۴-۶۳- مقایسه منحنی‌های قابلیت شناوری بدست آمده از آنالیز رهایی و آنالیز درختی نمونه معادن نگین و معدنچو ..... ۱۷۶
- شکل ۴-۶۴- مقایسه منحنی‌های آنالیز رهایی معکوس نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو ..... ۱۷۷
- شکل ۴-۶۵- مقایسه منحنی‌های آنالیز درختی نمونه معادن یک و مرکزی با نمونه معادن نگین و معدنچو ..... ۱۷۸
- شکل ۴-۶۶- منحنی‌های زمان-بازیابی حاصل از اولین آزمایش سینتیک طراحی آزمایش‌ها ..... ۱۷۹
- شکل ۴-۶۷- منحنی‌های  $\ln(1-(R/R_0))$  در مقابل زمان برای اولین آزمایش سینتیک طراحی آزمایش‌ها ..... ۱۸۰
- شکل ۴-۶۸- مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ثابت سینتیک برای مواد قابل احتراق ..... ۱۸۴
- شکل ۴-۶۹- منحنی‌های تأثیرات پارامترهای اصلی بر روی ثابت سینتیک مواد قابل احتراق ..... ۱۸۵
- شکل ۴-۷۰- منحنی‌های تأثیرات متقابل پارامترهای اصلی بر روی ثابت سینتیک مواد قابل احتراق ..... ۱۸۶
- شکل ۴-۷۱- منحنی تأثیر ابعاد ذره و درصد جامد بر روی ثابت سینتیک مواد قابل احتراق ..... ۱۸۷
- شکل ۴-۷۲- منحنی سه بعدی تأثیر ابعاد ذره و درصد جامد بر روی ثابت سینتیک مواد قابل احتراق ..... ۱۸۷
- شکل ۴-۷۳- مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ثابت سرعت اولیه برای مواد قابل احتراق ..... ۱۹۱
- شکل ۴-۷۴- منحنی‌های تأثیرات پارامترهای اصلی بر روی ثابت سرعت اولیه ..... ۱۹۲
- شکل ۴-۷۵- منحنی‌های تأثیرات متقابل پارامترهای اصلی بر روی ثابت سرعت اولیه ..... ۱۹۲
- شکل ۴-۷۶- منحنی تأثیر ابعاد ذره و درصد جامد بر روی ثابت سرعت اولیه ..... ۱۹۳
- شکل ۴-۷۷- منحنی سه بعدی تأثیر ابعاد ذره و درصد جامد بر روی ثابت سرعت اولیه ..... ۱۹۳
- شکل ۴-۷۸- مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده درصد خاکستر زغال تمیز ..... ۱۹۷
- شکل ۴-۷۹- منحنی‌های تأثیرات پارامترهای اصلی بر روی درصد خاکستر زغال تمیز ..... ۱۹۸
- شکل ۴-۸۰- منحنی‌های تأثیرات متقابل پارامترهای اصلی بر روی درصد خاکستر زغال تمیز ..... ۱۹۹
- شکل ۴-۸۱- منحنی تأثیر ابعاد ذره و غلظت کلکتور بر روی درصد خاکستر زغال تمیز ..... ۱۹۹
- شکل ۴-۸۲- مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۳
- شکل ۴-۸۳- منحنی‌های تأثیرات پارامترهای اصلی بر روی راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۴
- شکل ۴-۸۴- منحنی‌های تأثیرات متقابل پارامترهای اصلی بر روی راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۵
- شکل ۴-۸۵- منحنی تأثیر ابعاد ذره و غلظت کلکتور بر روی راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۵
- شکل ۴-۸۶- منحنی سه بعدی تأثیر ابعاد ذره و غلظت کلکتور بر روی راندمان زغال تمیز ..... ۲۰۶
- شکل ۴-۸۷- مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده بازیابی زغال تمیز ..... ۲۰۹
- شکل ۴-۸۸- منحنی‌های تأثیرات پارامترهای اصلی بر روی بازیابی زغال تمیز ..... ۲۱۰
- شکل ۴-۸۹- منحنی‌های تأثیرات پارامترهای اصلی بر روی بازیابی زغال تمیز ..... ۲۱۱
- شکل ۴-۹۰- منحنی تأثیر ابعاد ذره و درصد جامد بر روی بازیابی زغال تمیز ..... ۲۱۲
- شکل ۴-۹۱- منحنی سه بعدی تأثیر ابعاد ذره و درصد جامد بر روی بازیابی زغال تمیز ..... ۲۱۲
- شکل ۴-۹۲- منحنی تأثیر غلظت کلکتور و غلظت کف‌ساز بر روی بازیابی زغال تمیز ..... ۲۱۳
- شکل ۴-۹۳- مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده شاخص انتخابی بودن ..... ۲۱۶
- شکل ۴-۹۴- منحنی‌های تأثیرات پارامترهای اصلی بر روی شاخص انتخابی بودن ..... ۲۱۷
- شکل ۴-۹۵- منحنی‌های تأثیرات متقابل پارامترهای اصلی بر روی شاخص انتخابی بودن ..... ۲۱۸
- شکل ۴-۹۶- منحنی تأثیر ابعاد ذره و درصد جامد بر روی شاخص انتخابی بودن ..... ۲۱۹
- شکل ۴-۹۷- منحنی سه بعدی تأثیر ابعاد ذره و درصد جامد بر روی شاخص انتخابی بودن ..... ۲۱۹



## مقدمه

نقش فلوتاسیون در فرآوری زغال سنگ، پرعیارکردن ذرات بسیار ریز می باشد که کارآیی شستشوی آنها از طریق فرآیندهای فرآوری ثقلی مطلوب نیست. فلوتاسیون مواد معدنی اصولاً در چند مرحله شامل پرعیارکنی اولیه (رافر)، پرعیارکنی ثانویه (کلینر) و یا رمق گیر انجام می پذیرد. وقتی که هدف دستیابی به راندمان بالاتر است از مرحله رمق گیر استفاده می شود و موقعی که هدف دستیابی به کیفیت مناسب تر محصول می باشد از کلینر استفاده می شود. هدف از طراحی مدارهای فلوتاسیون مختلف، دستیابی به کارآیی بالاتر مدار با هزینه کمتر می باشد. اصول طراحی و سازماندهی مدارهای فلوتاسیون عبارتند از سینتیک و رفتار سینتیکی خوراک، نوع و نحوه آماده سازی مواد شیمیایی، مقدار ماده با ارزش در خوراک، خصوصیات شستشوپذیری، خاکستر و دانه بندی خوراک، میزان درگیر بودن کانی ها، نوع ماشین های فلوتاسیون، خصوصیات محصول و راندمان، هزینه سرمایه گذاری و عملیاتی، ظرفیت سلول ها و زمان ماند [۱].

با توجه به پیچیدگی عملیات فلوتاسیون زغال سنگ، پارامترهای تأثیرگذار بر آن بسیار زیاد هستند و می توان آنها را به چهار گروه پارامترهای مواد، شیمیایی، عملیاتی و تجهیزاتی تقسیم کرد. پارامترهای مواد شامل ابعاد ذرات، آزادسازی، اکسیداسیون و غیره می شوند. پارامترهای شیمیایی شامل کلکتور، کف ساز و تنظیم کننده می باشند. پارامترهای عملیاتی شامل نرخ خوراک، چگالی، نرخ هوادهی و غیره هستند. و پارامترهای تجهیزاتی شامل نوع سلول، طراحی سلول، چیدمان بانک سلول و غیره می باشند. بدیهی است که با کنترل مناسب این پارامترها می توان راندمان مدار فلوتاسیون را بهبود بخشید [۲].

فلوتاسیون ستونی<sup>۱</sup>، یک تکنیک پیچیده شناورسازی است که جایگزینی برای فلوتاسیون مکانیکی دارای همزن شده است [۳]. توسعه ستون فلوتاسیون مهمترین دستاورد در زمینه فرآوری مواد معدنی در چند دهه گذشته بوده است. این مربوط به طراحی، اسپارجرها<sup>۲</sup> و سیستم های جدید توزیع آب شستشو، اندازه گیری مستقیم ماندگی گاز در پالپ ها و نقش مواد جامد در ماندگی

---

1- Column flotation  
2- Spargers

گاز، مدلسازی دینامیک، شبکه‌های عصبی برای بهبود سطح دقت آشکارسازی، بزرگ مقیاس کردن و کاربرد ستون‌های فلوتاسیون می‌باشد. در سال‌های اخیر توسعه علوم کاربردی مربوط به طراحی و ساخت، بهره‌برداری، تزریق گاز و کنترل عملیات در ستون‌های فلوتاسیون موجب استفاده گسترده این ستون‌ها در صنایع فرآوری مواد معدنی شده است.

در فلوتاسیون ستونی، پارامترهای طراحی و عملیاتی بر عملکرد ستون مؤثرند. پارامترهای طراحی عبارتند از قطر ستون، ارتفاع ناحیه‌های جمع‌آوری و شستشو، ابعاد پخش کننده هوا، نوع سیستم آب شستشو، نوع بافل‌ها، تقویت کننده سیستم و غیره. متغیرهای عملیاتی قابل تغییر عبارتند از نرخ آب شستشو، نرخ باطله، سرعت هوا، غلظت کف‌ساز، غلظت کلکتور و نرخ خوراک. متغیرهای کنترل شده عبارتند از سطح فصل مشترک، عمق کف، نرخ بایاس، درصد مواد جامد در کنسانتره، ماندگی گاز و چگالی پالپ در ستون [۴].

علی‌رغم شواهد تئوری و اصول فلوتاسیون، کارآیی مدارهای فلوتاسیون زغال، عموماً کمتر از حالت مطلوب است. کارآیی مدار فلوتاسیون تا حدود زیادی به مشخصات زغال ورودی و سطوح متغیرهای عملیاتی و طراحی وابسته است و نتایج بهینه عملیات فلوتاسیون زغال به کنترل مناسب متغیرهای عملیاتی نیازمند است. بنابراین جهت کنترل مناسب عملیات فلوتاسیون و همچنین بهینه‌سازی عملیات، دانستن وضعیت عملکرد آن ضروری است [۵].

این تحقیق شامل ۵ فصل می‌باشد، که در فصل اول کلیاتی در مورد فلوتاسیون زغال سنگ و ستون‌های فلوتاسیون ارائه شده است. فصل دوم به تشریح فرآیند در کارخانه زغال‌شویی پروده طبس و مشخصات مدار فلوتاسیون آن می‌پردازد. فصل سوم مواد و روش‌های به کار برده شده بررسی شده است. فصل چهارم در مورد نتایج آزمایش‌های صنعتی و آزمایشگاهی و تحلیل آنها می‌باشد. در فصل پنجم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادها بیان شده است.

# فصل اول

کلیات

## ۱-۱- روش‌های فرآوری زغال سنگ

فرآوری زغال سنگ با ابعاد کوچکتر از ۱ mm، همیشه سخت‌تر از تمیز کردن زغال سنگ درشت‌تر بوده است. اگرچه دستگاه‌های مختلفی مانند اسپیرال‌ها (مارپیچ‌ها) و سیکلون‌های واسطه سنگین می‌توانند این ابعاد را تا بالای ۰٫۱۵ mm با بازدهی مناسب فرآوری کنند، ولی مدار کلی به دلیل حذف ناکافی بخش فوق‌العاده ریز ذرات، دارای نقص است. یک مدار رایج امروزی، شامل ارسال مواد زیر ۱ mm به سیکلون طبقه‌بندی و ارسال سرریز آن (صفر تا ۱۵۰ میکرون) به فلوتاسیون یا دور ریختن آن، و تمیز کردن ته‌ریز سیکلون در اسپیرال‌ها می‌باشد. این مدار سه مشکل اصلی دارد. یکی این که مارپیچ‌ها در واقع تنها یک محدوده ابعادی مشخص را تمیز می‌کنند و در محدوده کوچکتر از ۰٫۲۵ mm از کارایی کمی برخوردارند. مشکل دوم، بالا بودن نقطه جدایش در مارپیچ‌هاست، که این نقطه معمولاً بالای ۱/۸ SG است. مشکل سوم، مواد فوق‌العاده ریزی هستند که اشتباهاً به ته‌ریز سیکلون طبقه‌بندی رفته‌اند. این نابه‌جایی می‌تواند به اندازه ۲۰٪ مواد فوق‌العاده ریز (زیر ۰٫۱۵ mm) خوراک سیکلون باشد. تقریباً تمام مواد فوق‌العاده ریز موجود در خوراک یک اسپیرال به محصول زغال سنگ تمیز انتشار پیدا می‌کنند. معمولاً تلاش‌هایی برای نرمه‌گیری جریان زغال سنگ تمیز از جمله استفاده از سرندهای قوسی یا حتی گاهی، یک مدار اضافی از سیکلون طبقه‌بندی انجام شده است. حتی با این نرمه‌گیری اضافی، اغلب، نرمه‌های حاوی خاکستر بالا وجود دارند که منجر به افزایش قابل توجهی در خاکستر محصول شوند.

شکل ۱-۱، روش‌های معمول فرآوری زغال سنگ در محدوده‌های ابعادی مختلف را از گذشته تا به امروز نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، زغال سنگ درشت که قبلاً اغلب در جیگ تمیز می‌شد، در حال حاضر اغلب در جداکننده‌های واسطه سنگین تمیز می‌شود. از طریق تمیز کردن ابعاد درشت همراه با ابعاد متوسط در یک سیکلون واسطه سنگین، چیدمان مدار را می‌توان تا حدود زیادی ساده کرد. ابعاد متوسط که قبلاً در جیگ‌ها یا میزهای دیستر<sup>۱</sup> تمیز می‌شدند، در

1- Deister