

مدل سازی و شبیه سازی در سیستم های فرآوری مواد معدنی

ترجمه:

پروفسور بهرام رضائی
(استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

تألیف

ر.پ. کینگ

انتشارات جهاد دانشگاهی
واحد صنعتی امیرکبیر

سرشناسه : کینگ، رونالد پتر. ۱۹۳۸ - م.

King, R. P. (Ronald Peter)

عنوان و نام پدیدآور : مدل سازی و شبیه سازی در سیستم های فراوری مواد معدنی / تألیف ر.پ. کینگ: ترجمه بهرام رضایی .

مشخصات نشر : تهران: جهاد دانشگاهی. واحد صنعتی امیرکبیر. ۱۳۹۱.

مشخصات ظاهری : ۴۹۶ ص.: مصور، جدول.

شابک : 978-964-210-122-1 : ۱۵۰۰۰۰ ریال

وضعیت فهرست نویسی : فیا

یادداشت : عنوان اصلی: Modeling and simulation of mineral processing systems

موضوع : Ore-dressing --Mathematical models.

موضوع : Ore-dressing --Computer simulation.

شناسه افزوده : رضائی، بهرام. ۱۳۳۸ - مترجم

شناسه افزوده : جهاد دانشگاهی. واحد صنعتی امیر کبیر

رده بندی کنگره : ۳۹۱ - ۴۹/۴۹ TN۵۰۰

رده بندی دیویی : ۶۳۷/۷۰۱۴۱۱۸

شماره کتابشناسی ملی : ۲۸۶۰۹۸۹



انتشارات جهاد دانشگاهی

واحد صنعتی امیرکبیر

• نام کتاب : مدل سازی و شبیه سازی در سیستم های فراوری مواد معدنی

• ترجمه : پروفسور بهرام رضائی

• تألیف : ر.پ. کینگ

• نوبت چاپ : اول

• سال چاپ : ۱۳۹۱

• شمارگان : ۵۰۰ نسخه

• قیمت : ۱۵۰۰۰۰ ریال

• چاپخانه : اصیل

• شابک : ۹۷۸-۹۶۴-۲۱۰-۱۲۲-۱ : ISBN: 978-964-210-122-1

• آدرس مرکز پخش : تهران - خیابان حافظ - روبروی خیابان سمیه - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تلفن کتابفروشی: ۶۶۴۶۵۳۹۲ (دفتر) ۸۸۸۹۵۹۶۹ فاکس ۶۶۹۵۰۹۸۲

به نام خدا

پیشگفتار

مقدمه مترجم

امروزه، به دلیل پیچیدگی در مدارها و سیستم‌های فرآوری مواد معدنی توسعه مدل‌ها بسیار مشکل است. از عمده این مشکلات می‌توان به تغییرات بار ورودی اشاره کرد. از طرفی کلیه فرایندها را به دلیل ویژگی‌های خاص آنها، نمی‌توان با یک مدل خاص ارزیابی، بررسی و کنترل کرد. مدل (تکنیک) موازنه جمعیتی (PBM) نمونه‌ای بارز و متفاوت در این مورد بوده و محور اصلی تحقیقات در مدل‌سازی کلیه فرایندهای موجود در فرآوری مواد معدنی را به خود اختصاص می‌دهد. در بخش‌های مختلف این کتاب نیز از این مدل استفاده شده است.

عموماً تکنیک‌های شبیه‌سازی به دلیل عدم هزینه‌های سنگین مانند آزمایشات، زمان و دیگر موارد در سیستم‌های فرآوری مواد معدنی بسیار متداول بوده و برای ارزیابی اندرکنش بین مدل‌ها و در توسعه آنها به منظور شبیه‌سازی فلوشت‌های پیچیده در نرم‌افزارها به خصوص نرم‌افزار "مدسیم" ارائه شده است.

مدسیم (MODSIM) به عنوان یک بسته نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی مدارهای فرآوری مواد معدنی طراحی شده است. این نرم‌افزار به صورت یک لوح فشرده به همراه نسخه لاتین کتاب ارائه شده و در کتابخانه اکثر دانشکده‌های مهندسی معدن ایران موجود و در سایت www.mineraltech.com/modsim قابل بارگذاری می‌باشد. اگرچه نسخه پیوست شده به

کتاب لاتین، قابلیت‌های محدودتری نسبت به نسخه حرفه‌ای و منبع باز نرم‌افزار دارد، اما می‌توان آن را برای شبیه‌سازی اغلب تجهیزات و مدارهای مرسوم در فرآوری مواد معدنی استفاده نمود. نسخه پیوست شده به کتاب، در سیستم عامل ویندوز XP نصب و صحت عملکرد آن تأیید شده است. مراحل نصب نرم‌افزار بسیار ساده است. با قرار دادن لوح فشرده در درایو نوری، مراحل نصب به صورت خودکار آغاز شده و نرم‌افزار در مسیر مشخصه شده توسط کاربر نصب می‌شود. پس از نصب، یک پوشه به صورت خودکار باز می‌شود. که در برگرفته لینک اصلی اجرای نرم‌افزار و لینک راهنمای استفاده از نرم‌افزار (به صورت فایل PDF) است. راهنمای استفاده از نرم‌افزار اگرچه به زبان انگلیسی نگاشته شده، ولی به دلیل وجود شکل‌های مفید و مثال‌های واقعی در مورد نحوه استفاده از مدسیم، بسیار کاربرپسند است. نحوه انتخاب تجهیزات مختلف فرآوری، وارد نمودن داده‌ها، اتصال سری و موازی تجهیزات فرآوری و مدل‌سازی مدارهای فرآوری، اجرای شبیه‌سازی و ذخیره کردن نتایج به طور کامل در این راهنما و توسط مثال‌های واقعی توضیح داده شده است. همچنین نرم‌افزار، تعداد زیادی از تجهیزات و مدارهای فرآوری مواد معدنی را به صورت پیش فرض در اختیار کاربر قرار می‌دهد. کاربر با استفاده از راهنمای نرم‌افزار، به راحتی قادر به اجرای نرم‌افزار و استفاده از آن در جهت اهداف آموزشی و کاربردی خواهد بود.

شایان ذکر است، علیرغم موارد ذکر شده، نمی‌توان رفتار یک کارخانه را به طور دقیق شبیه‌سازی کرد. از این گذشته اعتبار سنجی خروجی‌ها نیز به دلایلی محدود می‌باشد.

جهت ترجمه این کتاب دقت بسیار زیادی صرف شده و لازم است از آقایان مهندس محمد رضا اصلانی، مهندس علی شهابی‌آذر، مهندس حمید خرمی، مهندس مصطفاالدین گلشن، مهندس جعفر شهرپور، مهندس احسان بیداری، مهندس مجتبی سرور، مهندس مهرداد سلیمانی، مهندس سیوان محمدی، مهندس سید حمید رضوی، مهندس علیرضا فرما، مهندس امین شعبانی، مهندس اسحاق صفرزاده و خانم‌ها مهندس یارمحمدی و صیفی‌خانی که در بررسی مجدد ترجمه‌ها کمک‌های شایانی را ارائه نموده‌اند، تشکر کنم.

با تشکر

بهرام رضایی

مقدمه مؤلف

فناوری و روش‌های مدل‌سازی عددی محور اصلی تحقیقات و توسعه در مهندسی فرآیند بوده و فرآوری مواد معدنی نیز از این امر مستثنی نمی‌باشد. در فرآوری مواد معدنی به دلیل پیچیدگی واحدهای عملیاتی که در سیستم‌های بازیابی مواد بکار می‌روند، توسعه مدل‌ها بسیار مشکل است. در حقیقت عمده این مشکلات ناشی از تغییرات ذاتی موجود در بار ورودی می‌باشد. اکثر تکنیک‌های مرسوم در مدل‌سازی ریاضی که اغلب برای تجهیزات مورد نیاز در فرآیند بکار می‌روند، کاربرد محدودی در سیستم‌های خاص داشته و مدل‌هایی که در اکثر واحدهای عملیاتی در فرآوری مواد معدنی بکار می‌روند ویژگی‌های خاص خود را دارند و کلیه فرآیندها را با یک مدل خاص نمی‌توان بررسی کرد. تکنیک "موازنه جمعیتی" نمونه‌ای آشکار و مستثنی در این مورد بوده و محور اصلی تحقیقات در مدل‌سازی است. در کلیه بخش‌های این کتاب از این مدل استفاده شده است. مدل‌های توصیف شده قطعاً در بسیاری از موارد کامل نبوده و توسط محققان دیگر در سال‌های آتی توسعه و ارتقاء خواهد یافت. گو اینکه مدل‌ها در عمل و در بسیاری از موارد، به خصوص در طراحی فرآیندها و تجهیزات بکار برده شده و از این گذشته برخی از مدل‌های توسعه یافته جدید نیز هنوز به طور جدی و عملیاتی در صنایع بکار گرفته نشده‌اند.

کتاب حاضر در سطحی ساده و بسیار مقدماتی تهیه گردیده و می‌بایستی در دسترس کلیه دانشجویان کارشناسی و تحصیلات تکمیلی قرار گیرد. در برخی از مثال‌ها، مدل‌هایی که کاربرد کمتری دارند تشریح شده‌اند. اکثر مدل‌های مطرح شده در این کتاب در شبیه‌سازی مدسیم (MODSIM) به صورت دیسکی فشرده موجود است. استفاده از این شبیه‌ساز، خواننده را جهت بررسی رفتار واحدهای عملیاتی یا شبیه‌سازی آنها علاقمند می‌سازد. کلیه مدل‌های ارائه شده کاملاً غیر خطی بوده و معمولاً در حل توابع ریاضی مستقیماً کاربرد ندارد و همیشه برای محاسبات ساده با استفاده از ماشین حساب و یا صفحه گسترده نیز مناسب نمی‌باشد.

در این کتاب روش شبیه‌سازی برای ارزیابی اندرکنش بین مدل‌ها توصیه و در توسعه مدل‌ها به منظور شبیه‌سازی فلوشت‌های پیچیده در فرآوری مواد معدنی استفاده شده است. تکنیک‌های

شبیه‌سازی به دلیل عدم هزینه‌های سنگین در حل مسایل پیچیده بسیار متداول بوده و کلیه مدل‌های توصیف شده با استفاده از نرم افزار مدسیم در دسترس علاقمندان قرار دارد.

مدل‌های ارائه شده برای کاربران بسیار شفاف بوده و می‌توان به طور مجزا و یا با ترکیبی از سایر واحدهای عملیاتی از آن استفاده کرد. نرم‌افزار مدسیم به عنوان ابزاری خودآموز برای دوره‌های مرسوم و در سال‌های اخیر نیز به عنوان پشتیبان دوره‌های اینترنتی از سوی دانشگاه یوتا به جوامع محققین ارائه شده است.

امیدوارم که اشاعه و ترویج مدل مدسیم بطور گسترده به همراه این کتاب، محققین و مهندسين را در به کار گیری این فناوری ترغیب نماید. شبیه‌سازی محدودیت‌های خاص خود را داشته و کاربر می‌بایست به یاد داشته باشد که یک شبیه‌ساز به طور دقیق نمی‌تواند رفتار یک کارخانه را مطابق آنچه است، نشان دهد. از این نظر، اعتبار سنجی خروجی حاصل از شبیه‌ساز نیز نسبت به کلیه اجزای مدل بکار رفته محدود می‌باشد.

در این کتاب از تحقیقات بسیاری از محققین با نگاه به شبیه‌سازی و مدل‌سازی استفاده شده است. از تحقیقات و مقالات موجود مفید در این زمینه برای واحدهای عملیاتی استفاده شده و ضمن معرفی روش‌های مدل‌سازی، مشاهدات دقیق تجربی در آینده نیز بررسی شده است.

لازم است تا از بسیاری از دانشجویان و همکاران که در تهیه داده‌های لازم، ایده‌های بسیار گران‌بهای ارائه کرده و در روش‌های پیشنهادی، اینجانب را همراهی کردند، تشکر کنم. جهت تألیف یک کتاب وقت زیادی صرف می‌شود و در اینجا لازم است از همسرم الیز که اینجانب را با دلگرمی همراهی کرده تشکر کنم.

لازم است از کارل هاینر که بازبینی این کتاب را به عهده داشته و کی آرکیل که مسئول رایانه مثال‌های حل شده در این کتاب بوده و در خاتمه از کلیه همکارانی که اینجانب را در تألیف این کتاب همراهی نموده‌اند تشکر کنم.

کینگ - ر - پ

شهر سانت لیک

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱	۱
مقدمه	۱
کتاب‌شناسی	۶
منابع و مآخذ	۶
فصل ۲	۷
جوامع ذرات و توابع توزیع	۷
۱-۲- مقدمه	۷
۲-۲- توابع توزیع	۸
۱-۲-۲- توابع توزیع تجربی	۱۱
۲-۲-۲- توزیع‌های ابعادی ترانک (گرد)	۱۴
۳-۲- توزیع تابع چگالی	۱۶
۴-۲- توزیع براساس تعداد، ابعاد معرف و متوسط‌های جامعه	۱۹
۵-۲- توزیع براساس ترکیب ذره	۲۳
۶-۲- تابع توزیع پیوسته	۲۴
۷-۲- توابع توزیع شرطی	۲۶
۱-۷-۲- نمایش عملی توزیع‌های عیار مشروط - منحنی قابلیت شستشویذیری	۳۱
۲-۷-۲- محاسبه توزیع عیار با استفاده از آنالیز تصویری	۳۵

۳۷.....	۲-۷-۳- تغییر شکل منطقی داده‌های اندازه‌گیری شده
۴۰.....	۲-۸- استقلال
۴۱.....	۲-۹- توزیع‌ها بوسیله عدد
۴۳.....	۲-۱۰- چگالی توزیع و مختصات ذرات داخلی و خارجی
۴۵.....	۲-۱۱- تأثیر مشخصات داخلی بر ویژگی‌های ذره
۴۵.....	۲-۱۲- روش مدل‌سازی موازنه جمعیتی
۴۷.....	۲-۱۳- معادله موازنه جمعیتی اولیه
۵۲.....	۲-۱۴- معادله کل موازنه جمعیتی برای دستگاههای خردایش
۵۵.....	کتاب‌شناسی
۵۶.....	منابع و مأخذ

فصل ۳ ۵۷

۵۷.....	آزادسازی کانی
۵۹.....	۳-۱- توزیع بتا برای آزادسازی کانی
۶۳.....	۳-۲- بیان ترسیمی توزیع آزادسازی
۶۶.....	۳-۳- پیش‌بینی کمی آزادسازی کانی
۶۷.....	۳-۳-۱- تشخیص بافت کانی‌شناسی توسط تحلیل تصویری
۷۳.....	۳-۴- شبیه‌سازی آزادسازی کانی در طول خردایش
۷۳.....	۳-۴-۱- مرزهای نمودار اندروز- میکا
۸۲.....	۳-۴-۲- ساختار داخلی نمودار اندروز-میکا
۸۷.....	۳-۵- خردایش غیرتصادفی
۹۲.....	۳-۶- دیاگرام گسسته‌ی اندروز-میکا
۹۹.....	۳-۷- علامتهای اختصاری استفاده شده در این فصل

کتاب‌شناسی	۱۰۰
منابع و مأخذ	۱۰۲

فصل ۴ ۱۰۳

طبقه‌بندی ابعادی	۱۰۳
۱-۴- مبنای جدایش با سرندهای لرزان	۱۰۴
۱-۴-۱- مدل‌های مبتنی بر ظرفیت سرند	۱۰۴
۱-۴-۲- کارایی جدایش	۱۰۸
۲-۴- تابع طبقه‌بندی	۱۱۰
۱-۴-۲- مدل کارا	۱۱۱
۲-۴-۲- دستورالعمل جدایش در سرند	۱۱۵
۳-۴- مدل سینتیک ساده برای سرندکنی	۱۱۷
۱-۴-۳- مدل سینتیک <i>FPS</i>	۱۲۳
۴-۴- جدایش براساس ترسیب تفاضلی با هیدروسیکلون	۱۲۶
۱-۴-۴- فعل و انفعالات بین ذرات و سیالات	۱۲۶
۵-۴- سرعت حد رسوب	۱۳۱
۱-۵-۴- سرعت ته‌نشینی ذره کروی منفرد	۱۳۲
۲-۵-۴- قانون استوکس	۱۳۷
۳-۵-۴- تشکیل ذرات هم اندازه با شکل قراردادی	۱۳۹
۴-۵-۴- اصول کلی عملیات هیدروسیکلون	۱۴۴
۵-۵-۴- فرضیه مسیر چرخشی متعادل	۱۴۴
۶-۵-۴- عملکرد مدل‌های تجربی برای هیدروسیکلونها	۱۵۱
۷-۵-۴- مدل پلیت برای هیدروسیکلون	۱۵۶

- ۴-۶- محدودیت ظرفیت برای هیدروسیکلون ۱۶۰
- ۴-۷- نمادهای استفاده شده در این فصل ۱۶۱
- منابع و مأخذ ۱۶۲

فصل ۵ ۱۶۳

- عملیات خردایش ۱۶۳
- ۵-۱- خردایش مواد شکننده ۱۶۳
- ۵-۱-۱- سفی خردایش و تنش بحرانی ۱۶۳
- ۵-۲- الگوهای خردایش زمانی که یک ذره منفرد شکسته می شود ۱۶۷
- ۵-۳- احتمال شکست انرژی خردایش ذره ۱۷۱
- ۵-۴- توزیع ابعادی محصول زمانی که یک ذره منفرد شکسته می شود- تابع شکست ۱۷۵
- ۵-۴-۱- مدل های تجربی تابع شکست که بر مبنای ترکیب جوامع محصولات بنا شده است ۱۷۹
- ۵-۴-۲- مدل هایی برای تابع شکست بر اساس انرژی ضربه ۱۸۵
- ۵-۴-۳- مدل کلی (تعمیم یافته) ۱۹۱
- ۵-۵- انرژی مورد نیاز برای خردایش ۱۹۲
- ۵-۶- سنگ شکن ها ۱۹۵
- ۵-۶-۱- سنگ شکن های فکی و ژیراتوری ۱۹۵
- ۵-۶-۲- سنگ شکن های مخروطی ۱۹۸
- ۵-۶-۳- مکانیزم سنگ شکنی و توزیع ابعادی محصول ۲۰۰
- ۵-۷- آسیا کردن ۲۰۷
- ۵-۷-۱- عملیات آسیا کردن ۲۰۷
- ۵-۷-۲- سرعت بحرانی گردش آسیا ۲۱۱

- ۳-۷-۵- توان کشی به وسیله آسیاهای گلوله‌ای، نیمه خودشکن و خودشکن ۲۱۳
- ۴-۷-۵- توان کشی آسیای میله‌ای ۲۱۸
- ۵-۷-۵- طیف انرژی ضربه‌ای در یک آسیا ۲۱۹
- ۶-۷-۵- سینتیک شکست ۲۲۰
- ۸-۵- آسیای پیوسته ۲۲۲
- ۱-۸-۵- مدل موازنه جمعیتی برای یک آسیای مخلوط کامل ۲۲۲
- ۲-۸-۵- آسیا با طبقه‌بندی ثانویه ۲۲۴
- ۳-۸-۵- درجه آزادی مواد در آسیاهای گلوله‌ای ۲۲۷
- ۹-۵- ویژگی‌های مخلوط سازی در آسیاها ۲۲۸
- ۱۰-۵- مدل‌هایی برای آسیای میله‌ای ۲۳۰
- ۱۱-۵- مدل موازنه جمعیتی برای آسیاهای خودشکن ۲۳۱
- ۱-۱۱-۵- تاثیر تخلیه شبکه‌ای ۲۳۷
- ۱۲-۵- مدل‌هایی برای نرخ ویژه شکست در آسیاهای گلوله‌ای ۲۳۸
- ۱-۱۲-۵- مدل آستین برای نرخ ویژه شکست ۲۳۹
- ۲-۱۲-۵- افزایش مقیاس تابع انتخاب آستین ۲۴۱
- ۳-۱۲-۵- مدل $H-F$ برای نرخ ویژه شکست ۲۴۴
- ۴-۱۲-۵- مدل $JKMRC$ ۲۴۷
- ۵-۱۲-۵- افزایش مقیاس مدل $JKMRC$ ۲۴۸
- ۶-۱۲-۵- نرخ ویژه شکست در نتیجه طیف انرژی ضربه‌ای ۲۴۹
- ۱۳-۵- مدل‌هایی برای نرخ ویژه شکست در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن ۲۵۰
- ۱۴-۵- مدل‌هایی برای تابع شکست در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن ۲۵۶
- ۱۵-۵- توان آسیا و انتخاب آسیا ۲۵۷
- ۱-۱۵-۵- روش باند ۲۵۷
- ۱۶-۵- آسیای ناپیوسته ۲۶۱

- ۲۶۱..... ۵-۱۶-۱- آسیاکنی ناپیوسته جامدات همگن
- ۲۶۶..... ۵-۱۶-۲- آسیاکنی ناپیوسته جامدات ناهمگن
- ۲۶۸..... کتاب‌شناسی
- ۲۶۹..... منابع و مآخذ

فصل ۶..... ۲۷۵

- ۲۷۵..... جدایش جامد- مایع
- ۲۷۵..... ۶-۱- عملیات تیکتر کردن
- ۲۷۷..... ۶-۱-۱- تیکتر استوانه‌ای پیوسته
- ۲۸۳..... ۶-۲- مدل‌های مفید برای سرعت ته‌نشینی
- ۲۸۵..... ۶-۳- شبیه‌سازی عملیات تیکتر پیوسته
- ۲۸۹..... ۶-۴- آبیگری مکانیکی از بالپ
- ۲۸۹..... ۶-۴-۱- سرندهای آبیگری
- ۲۹۳..... ۶-۵- فیلتراسیون
- ۲۹۷..... کتاب‌شناسی
- ۲۹۸..... منابع و مآخذ

فصل ۷..... ۲۹۹

- ۲۹۹..... جدایش به روش ثقلی
- ۳۰۰..... ۷-۱- جدایش ثقلی با استفاده از واسطه‌های کاذب
- ۳۰۱..... ۷-۲- مدل‌های کمی برای جداکننده‌های ثقلی
- ۳۰۱..... ۷-۲-۱- حد جدایش
- ۳۰۵..... ۷-۲-۲- جریان‌های اتصال کوتاه

۳۰۶.....	۳-۲-۷- کارایی جدایش
۳۰۷.....	۴-۲-۷- تابع جدایش تصحیح شده
۳۱۰.....	۳-۷- جداکننده‌های خود واسطه
۳۱۲.....	۱-۳-۷- یک مدل کمی برای لایه‌بندی
۳۱۶.....	۲-۳-۷- لایه‌بندی سیستم‌های دوجزی
۳۱۹.....	۳-۳-۷- لایه‌بندی دربسترهای چندجزی
۳۲۱.....	۴-۳-۷- کارایی جیگ‌های یک و یا دو مرحله‌ای در شرایط عملیاتی پیوسته
۳۲۷.....	۵-۳-۷- مدلی برای ناوشتشو و مخروط ریچارد
۳۳۶.....	۴-۷- مدل‌های توابع جدایش تعمیم یافته برای واحدهای جدایش ثقلی
۳۴۰.....	کتاب‌شناسی
۳۴۰.....	منابع و مآخذ

فصل ۸..... ۳۴۳

۳۴۳.....	جدایش مغناطیسی
۳۴۳.....	۱-۸- رفتار ذرات در میدان مغناطیسی
۳۴۸.....	۲-۸- نیروهای مؤثر بر ذره در میدان مغناطیسی
۳۵۴.....	۳-۸- خواص مغناطیسی کانی‌ها
۳۵۵.....	۴-۸- دستگاه‌های جداکننده مغناطیسی
۳۵۶.....	۱-۴-۸- تولید میدان مغناطیسی
۳۶۱.....	۵-۸- تفکیک مغناطیسی خشک
۳۶۱.....	۱-۵-۸- مدل هاپستوک برای جداکننده مغناطیسی خشک با شدت پایین
۳۶۵.....	۲-۵-۸- ظرفیت جداکننده
۳۶۵.....	۶-۸- جداسازی مغناطیسی ترشده بالا

کتاب‌شناسی.....	۳۶۷
منابع و مأخذ.....	۳۶۷

فصل ۹..... ۳۶۹

فلوتاسیون.....	۳۶۹
۹-۱- ارزیابی سینتیکی مدل فلوتاسیون.....	۳۷۱
۹-۱-۱- فاز پالپ.....	۳۷۱
۹-۱-۲- فاز حباب هوا.....	۳۷۲
۹-۱-۳- فاز کف.....	۳۷۳
۹-۱-۴- فاز دنباله رو.....	۳۷۳
۹-۲- یک مدل سینتیکی برای فلوتاسیون.....	۳۷۴
۹-۲-۱- برخورد ذره- حباب.....	۳۷۶
۹-۲-۲- مدلی برای بازدهی برخورد.....	۳۷۹
۹-۲-۳- اتصال ذره به حباب.....	۳۸۴
۹-۳- توزیع ثابت مدل سینتیکی برای فلوتاسیون.....	۳۹۰
۹-۴- بارگیری حباب در طی فلوتاسیون.....	۳۹۳
۹-۵- زمان صعود حباب باردهی شده.....	۳۹۷
۹-۶- انفصال (جدا شدن) ذرات.....	۴۰۸
۹-۷- فاز کف.....	۴۰۹
۹-۷-۱- حرکت کف.....	۴۰۹
۹-۷-۲- فرایندهای دینامیکی در فاز کف.....	۴۱۵
۹-۷-۳- نرخ گسیختگی فیلم‌های لایه‌ای.....	۴۱۷
۹-۷-۴- زهکشی کف از بین مرزهای مسطح.....	۴۲۱

۴۲۸	۸-۹- مدل‌های ساده‌ی سینتیکی فلوتاسیون
۴۳۲	۸-۹-۱- کاربرد سلول‌های فلوتاسیون در فلوشیت‌های پیچیده
۴۳۴	۸-۹-۲- اثر ابعاد ذره بر نرخ فلوتاسیون
۴۳۷	۸-۹-۳- موازنه آب در سلول‌های صنعتی
۴۳۸	۹-۹- نمادهای مورد استفاده در این فصل
۴۴۱	منابع و مآخذ

فصل ۱۰ ۴۴۵

۴۴۵	شبیه‌سازی کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی
۴۴۵	۱۰-۱- ماهیت شبیه‌سازی
۴۵۰	۱۰-۲- استفاده از شبیه‌ساز
۴۵۲	۱۰-۳- ساختار فلوشیت
۴۵۲	۱۰-۳-۱- واحدهای عملیاتی کانه‌آرایی
۴۵۵	۱۰-۳-۲- آنالیز عددی شبیه‌سازی
۴۵۶	۱۰-۳-۳- روش شبیه‌سازی متوالی
۴۶۲	۱۰-۴- شبیه‌سازی واحدهای عملیاتی منفرد و فلوشیت‌های ساده
۴۷۳	۱۰-۵- فلوشیت‌های کامل
۴۹۵	علائم اختصاری
۴۹۶	منابع و مآخذ

مقدمه

این کتاب به بررسی مدل‌سازی کمی مربوط به عملیات واحدهای مرتبط با فرآوری مواد معدنی می‌پردازد. به کارگیری موازنه‌ی جمعیتی، چهارچوبی یکسان برای کلیه عملیات واحدهای فرآوری مواد معدنی از جمله جداسازی و انتقال را فراهم می‌سازد. بسیاری از عملیات فرآوری تا حدی شناخته شده‌اند که می‌توان در مورد آن‌ها مدلی مفید را ارائه و عملکردشان را به طور کمی توصیف کرد. داده‌های آزمایشگاهی که در دو دهه‌ی اخیر توسط محققین بدست آمده، پایه و اساس مدل‌های کمی است و در طراحی و شبیه‌سازی هر واحد مجزا در فاضلاب می‌توان آن‌ها را به کار برد. تأکید این کتاب بر روی روش‌های کمی است. بسیاری از روش‌های تجربی قدیمی که از اوایل قرن بیستم مورد استفاده قرار گرفته‌اند، منجر به دستورالعمل‌هایی گردیده که بر مبنای ماهیت و خواص‌سنجی موادی خاص استوار بوده و اساس اولیه واحدهای فرآوری را تشکیل می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد، تأکید این نوشتار، بر مدل‌سازی کمی است. کلیه تجهیزات فرآوری

مواد معدنی، رفتار عملیاتی پیچیده‌ای دارند و ارائه مدل‌های کمی برای این نوع عملیات، به راحتی میسر نمی‌باشد. در برخی موارد نیز، اصول بنیادی نوع خاصی از تجهیزات، به درستی شناخته نشده است و در بسیاری موارد، پیچیدگی عملیات، مانعی در تحلیل کامل فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی مربوط به تجهیزات و نیز کنترل عملکرد آنها است. علیرغم این مشکلات، پیشرفت‌هایی نیز در توسعه مدل‌های مفید برای اغلب تجهیزات بسیار مهم فرآوری مواد معدنی حاصل شده است.

شیوه‌ی مدل‌سازی مورد نظر در این کتاب، پدیده‌شناختی است. بدین معنی که پدیده‌های فیزیکی و تا حدودی شیمیایی رخ داده، به نحوی مدل می‌شوند که حقایق فیزیکی ذاتی فرآیند را نشان دهد. از این روش همواره نمی‌توان مدل کاملی را انتظار داشت و اغلب برای تکمیل مدل باید سطوحی از تجربیات را بکار گرفت. این رویکرد، جنبه‌های برتری نسبت به مدل‌های تجربی دارد. مدل‌های پدیده‌شناختی، به طور کامل بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، استوار نیستند. بنابراین زمانی که داده و مشاهدات جدیدی در اختیار قرار گیرد، نیاز به اصلاح اساسی ندارند. اگر اصول اساسی یک عملیات خاص به درستی فرموله و در قالب مدل‌ها گنجانده شود، این مدل، ضمن در اختیار قرار دادن اطلاعات بیشتر و شناخت وسیع‌تر از اصول اولیه، دائماً توسعه می‌یابد. به طور کلی مدل‌های پدیده‌شناختی، با تغییر شرایط عملیاتی در آزمایشگاه، دست‌خوش تغییر خاصی نمی‌شوند. افت و خیز در شرایط عملیاتی، اغلب با افزودن موارد بیشتر به مدل پدید می‌آید. چنانچه مدل بر اساس شرح دقیقی از اصول عملیاتی تجهیزات مورد نظر و شناخت از جزئیات رفتار ذرات جامد در تجهیزات باشد، اصول اولیه افزایش مقیاس، معمولاً می‌تواند با اطمینان بیشتری به کار گرفته شود. برون‌یابی عملیات خارج از محدوده معمول، چنانچه پدیده‌ها به منظور حصول اطمینان از داشتن رفتار جانبی مدل‌ها در شرایط حدی با دقت مدل شوند، کم‌خطرتر است.

یکی از ویژگی‌های مشترک کلیه مدل‌هایی که در این کتاب توسعه یافته‌اند، نقش اساسی ذرات جامد در وضعیت‌های خاص از عملیات واحد مورد نظر است. فرآوری مواد معدنی بر اساس جداسازی فیزیکی کانی‌ها استوار بوده و با در دست داشتن رایج‌ترین الگوهای پیدایش کانی‌ها در

کانسنگ‌های طبیعی قابل استخراج می‌توان روش‌های موفقیت‌آمیز جداسازی را با توجه به کاهش ابعاد در حد درجه آزادی مطلوب، عملی ساخت. ابعاد و ترکیب ذرات نقش مهمی در مدل دارند، زیرا رفتار ذرات در تجهیزات به طور مشخص تحت تأثیر این پارامترهاست. تأثیر ترکیب ذره اغلب غیرمستقیم است. زیرا محتوی کانی‌شناختی ذره مستقیماً بر روی چگالی، مشخصات سطحی، ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی تأثیر می‌گذارد. این خواص فیزیکی، به نوبه خود بر روی رفتار ذرات در تجهیزاتی که از اختلاف در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بین ذرات، برای جداسازی آنها طراحی شده است نیز اثرگذار است.

جداسازی فیزیکی کانی‌ها بسته به نوع کانی با کاهش ابعاد و بررسی درجه آزادی میسر بوده و این امر، نیاز شدید به توسعه مدل‌ها را ضروری می‌سازد. مدل کردن آزادسازی کانی‌ها اساساً به دلیل پیچیدگی کانی‌شناختی و مشکلات فرایندهای شکست، (که ضمن عملیات سنگ‌شکنی و آسیا کردن ماده معدنی قبل از جداسازی کانی‌ها صورت می‌گیرد) بسیار دشوار است. علی‌رغم این پیچیدگی‌ها، روش‌های متعددی طی در دهه گذشته توسعه یافته و مدل‌هایی که در اینجا استفاده می‌شوند دست کم برای توصیف آزادسازی کانی‌ها از کانسنگی که تنها یک کانی با ارزش دارد، مؤثر است. مدل‌سازی آزادسازی با توسعه سیستم‌های آنالیز تصاویری به کمک کامپیوتر، بسیار آسان است. با این روش‌ها ذرات حاوی چند کانی مورد آزمایش قرار گرفته و وضعیت فازهای کانی در انبوهی از ذرات، مستقیماً و بدون واسطه قابل رؤیت است. امروزه ابزارهای مدرن، توزیع کانی‌ها را با جزئیات بیشتری آشکار می‌سازد و تصاویر دیجیتالی بسیار دقیقی رواج یافته است. نرم‌افزارهای کامپیوتری برای آنالیز تصاویری دیجیتالی موجود بوده و با برنامه‌ای نسبتاً ساده تصاویر را پردازش و دست‌کاری کرده و سپس محتوای آن را با استفاده از الگوریتم‌های بسیار متنوعی که به طور اختصاصی برای اندازه‌گیری آزادسازی پدیده‌ها در کانسنگ‌های طبیعی توسعه یافته‌اند، تحلیل می‌کنند.

آزادسازی مواد معدنی پل ارتباطی بین عملیات خردایش و بازیابی مواد معدنی می‌باشد و مدل‌سازی مؤثر هر قسمت بدون توجه به پدیده آزادسازی امکان‌پذیر نیست. رویکرد مدل‌سازی در این کتاب، امر مذکور را کاملاً در نظر گرفته و آزادسازی مواد معدنی تا حد لازم مدل‌سازی

شده تا بتوان خریدایش و بازیابی مواد معدنی را به یکدیگر مرتبط ساخت.

روش موازنه جمعیتی به کار گرفته شده چهارچوب یکسانی برای مدل ها ارائه می دهد. این روش به فرد مدل ساز اجازه می دهد که رفتار هر نوع ذره را در تجهیزات فرآوری، همزمان با خواص آماری جوامع ذرات بررسی کند. مدل های موازنه جمعیتی مخصوصاً در عملیات واحد، مانند آسیاها که در آن ذرات از نظر ابعاد و ترکیب تغییر می کنند، مفیدند. با این روش می توان مکانیزم های مختلف شکست مانند ضربه و سایش را به طور جداگانه مدل کرد. ولی تأثیر زیرفرایندها نیز قابل بررسی است. از این گذشته، متدلوژی به نحو مطلوبی توسعه یافته و مدل هایی که بر اساس آنها استوارند را می توان به راحتی برای محاسبات کدگذاری نمود.

مدل هایی که در تجهیزات فرآوری مواد معدنی بکار می روند، به منظور اهداف دیگری مانند طراحی و توسعه ی فرآیند و کارخانه، ارزیابی و برآورد کارایی تجهیزات، افزایش مقیاس و به خصوص در امر شبیه سازی کاربرد فراوانی دارند. بیشتر مدل هایی که در این کتاب ارائه شده، نخست به منظور ارائه بلوک های سازنده ی شبیه سازی عملیات یک کارخانه کامل فرآوری مواد معدنی توسعه یافته اند، بنابراین همه ی مدل ها ساختار مشترکی دارند به نحوی که می توانند در کنار هم به صورت یکپارچه درون یک شبیه ساز کارخانه قرار گیرند. روش موازنه ی جمعیتی ضمن تأمین این هدف، محصولات هر مدل که بار ورودی مدل دیگر می باشند را به طور مناسبی فراهم می سازد.

تاکنون کلیه مدل هایی که توسعه یافته اند، به طور ویژه ای برای محاسبات کامپیوتری نیز استفاده شده اند. شبیه سازی، طیف وسیعی از سیستم های مهندسی امروزه بوده و به عنوان تنها روش پایدار برای تحلیل آنها پذیرفته شده است. به طور تئوری، روش هایی که مبتنی بر راه حل های تحلیلی دقیق و کامل برای معادلات عملیاتی است و بیشتر سیستم های فرآوری مواد معدنی را توصیف می کنند، اغلب به اندازه کافی جامع نیستند و راه حل کارآمد و مفیدی ارائه نمی دهند. کامپیوترهای شخصی امروزه در دسترس تمامی مهندسانی که تصمیم گیری های عملیاتی و طراحی را با در نظر گرفتن عملیات کارخانه فرآوری مواد معدنی انجام می دهند، قرار دارد. بسته های نرم افزاری متعددی برای تحلیل داده ها در چهارچوب مدل های کمی که در این

کتاب شرح داده شده در دسترس می‌باشد.

کلیه مدل‌هایی که در این مجموعه ارائه شده است، در نرم‌افزار شبیه‌ساز کارخانه فرآوری مواد معدنی به نام *MODSIM* قرار دارند. این نرم‌افزار یک سیستم شبیه‌سازی کم هزینه و دارای کارایی بالاست که روی یک لوح فشرده همراه کتاب اصلی آمده و می‌تواند برای شبیه‌سازی عملیات در حالت پایدار در مورد هر کارخانه کانه‌آرایی به کار گرفته شود. این شبیه‌ساز در مورد تعداد زیادی کارخانه کانه‌آرایی آزمایش شده و قابل اعتماد می‌باشد. به همراه این لوح نیز دستورالعمل کاملی وجود دارد. پایه‌ی فرضی و تئوریک روش شبیه‌سازی که در *MODSIM* به کار گرفته شده، به طور مفصل در این کتاب بحث شده و مدل‌های مورد استفاده نیز در شبیه‌سازی ارائه شده است. خواننده جهت جستجو در مفاهیم مدل‌هایی که در این کتاب استفاده شده، می‌تواند به شبیه‌ساز توسعه یافته مراجعه کند.

به جز موارد محدودی، همین مدل‌هایی که در این کتاب ارائه شده، در *MODSIM* موجودند. شبیه‌سازی یک عملیات واحد، کار ساده‌ای است و بنابراین خواننده می‌تواند تأثیر تغییر در مقادیر پارامترها را بر روی مدل پیش‌بینی کند. در اغلب موارد، مدل‌های قابل جایگزینی نیز برای هر عملیات واحد ارائه شده که این امر مقایسه‌ی بین پیش‌بینی‌های مدل‌های مختلف را تحت شرایط یکسان برای خواننده آسان می‌کند. در ضمن تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل‌های واحد در شبیه‌سازی کامل یک کارخانه می‌تواند مفید باشد. تعدادی از شبیه‌سازی‌های کارخانه‌ها در لوح فشرده ارائه شده و به خواننده پیشنهاد می‌شود که آن‌ها را اجرا کرده و امکانات متنوع شبیه‌ساز را بررسی کند.

افراد بسیاری در توسعه‌ی مدل‌ها در عملیات فرآوری مواد معدنی سهیم بوده‌اند. هیچ تلاش جهت‌داری در نسبت دادن مدل‌ها به محققان خاصی صورت نگرفته و ارجاعات رسمی مقالات در متن تا حد امکان کمینه شده تا خواننده از موضوع اصلی خارج نشود. یک کتاب‌شناسی مختصر و مفید در پایان هر فصل ارائه شده است. این امر به خواننده منابع اصلی برای کسب اطلاعات بیشتر از مدل‌های مورد بحث را معرفی می‌کند.

کتاب‌شناسی

کتاب حاضر نباید به عنوان پایه برای دروس تکنولوژی فرآوری مواد معدنی تلقی شود و لازم است در کنار سایر کتبی که به شرح عملیات فرآوری مواد معدنی و کاربرد صنعتی آن‌ها پرداخته‌اند استفاده شود. خصوصاً در این راستا کتاب *Wills' Mineral Processing Technology* (۱۹۹۷) پیشنهاد می‌شود. دو جلدی *SME Mineral Processing Handbook* (Weiss, ۱۹۸۵) منبع فوق‌العاده ارزشمندی از اطلاعات راجع به عملیات کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی است و در جایی که جزئیات مکانیکی یک واحد عملیاتی مشخص مد نظر باشد، از آن استفاده می‌شود. مبانی مدل‌سازی تئوریک، توسط Kelly و Spottiswood (۱۹۸۲) و Tarjan (۱۹۸۱، ۱۹۸۶) ارائه شده است. Woolacott و Eric (۱۹۹۴) شرحی کمی و پایه‌ای برای تعدادی از عملیات فرآوری مواد معدنی ارائه داده‌اند. کتاب مفید گادین در سال ۱۹۳۹ با وجود گذشت زمان هنوز هم منبعی بسیار با ارزشی از اطلاعات علمی در زمینه عملیات واحد فرآوری مواد معدنی است.

منابع و مأخذ

- Gaudin, A.M. (1939) *Principles of Mineral Dressing*. McGraw-Hill, New York.
- Kelly, E.G. and Spottiswood, D.J. (1982) *Introduction to Mineral Processing*. Wiley, New York.
- Tarjan, G. (1981) *Mineral Processing. Vol 1*. Akademiai Kiado, Budapest.
- Tarjan, G. (1986) *Mineral Processing. Vol 2*. Akademiai Kiado, Budapest.
- Weiss, N.L. (ed.) (1985) *SME Mineral Processing Handbook. Vols 1 and 2*. SME, Littleton, CO.
- Wills, B.A. (1997) *Mineral Processing Technology*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Woolacott, L.C. and Eric, R.H. (1994) *Mineral and Metal Extraction. An Overview*. S. Afr. Inst. Min. Metall. Johanne