

کورهای دوار

آکرواسی آپچیونگ پروتنگ

ترجمه

مسعود رضا شاکری

با همکاری مرضیه عقابی



مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف



شرکت صنایع سیمان غرب



مؤسسه انتشارات علمی
دانشگاه صنعتی شریف

Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes

by: Akwasi Acheampong Boateng

Elsevier, 2008

کوره‌های دوار

تألیف آکواسی آچمپونگ بوتنگ

ترجمه مسعود رضا شاکری، مرضیه عقابی

چاپ اول: ۱۳۹۱

شمارگان: ۱۰۰۰

بها: ۸۰۰۰۰ ریال

حق چاپ برای مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف محفوظ است.

ISBN 978-964-208-053-3

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۲۰۸-۰۵۳-۳

این کتاب با کمک مالی شرکت صنایع سیمان غرب منتشر شده است.

تلفن: ۶۶۱۶۴۰۷۲-۶۶۱۶۴۰۷۰-۶۶۰۱۲۰۳۹

دفتر مرکزی: خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف

دفتر فروش: میدان انقلاب - خیابان شهید منیری جاوید (اردیبهشت) - ساختمان ۲۵۲ - طبقه چهارم - واحد ۴۰۲

تلفن: ۶۶۹۶۷۸۹۶-۶۶۴۰۵۱۳۲ پست الکترونیکی: publication@nich.sharif.edu

موضوع: کوره‌های دوار.

موضوع: بطریقه انتقال.

شناسه افزودن: شاکری، مسعود رضا، ۱۳۳۲-، مترجم.

شناسه افزودن: عقابی، مرضیه، ۱۳۳۵-، مترجم.

شناسه افزودن: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی.

رده‌بندی کنگره: ۶۶۰/۲۸۲۳۶

رده‌بندی دیویی: ۶۶۰/۲۸۲۳۶

شماره کتابشناسی ملی: ۲۶۵۵۷۷۳

سرشناسه: بوتنگ، آکواسی، آچمپونگ، ۱۹۵۱-م.

Boateng, Akwasi Acheampong

عنوان و نام‌پدیدآور: کوره‌های دوار / تألیف: آکواسی، آچمپونگ

بوتنگ، ترجمه مسعود رضا شاکری، مرضیه عقابی.

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات

علمی، ۱۳۹۰.

مشخصات ظاهری: ۳۷۲ ص:، محور، جدول، نمودار.

شابک: ISBN 978-964-208-053-3

وضعیت فهرست نویسی: فیا.

یادداشت: عنوان اصلی:

Rotary kilns: Transport Phenomena and

Transport Processes, c2008

به نام خدا

فهرست مطالب

هفت

نه

مقدمه مترجم

مقدمه مؤلف

۱

فصل ۱ پدیده و تکامل کوره دوار

۱

۱.۱ تکامل کوره دوار

۴

۱.۱.۱ مقایسه کوره دوار با کوره های تماسی دیگر

۷

۲.۱ انواع کوره های دوار

۸

۱.۲.۱ کوره های تر

۹

۲.۲.۱ کوره های خشک بلند

۱۰

۳.۲.۱ کوره های خشک کوتاه

۱۰

۴.۲.۱ خنک کنها و خشک کنها

۱۰

۵.۲.۱ کوره های شعله - غیرمستقیم

۱۵

فصل ۲ تشریح اصول بهره برداری از کوره های دوار

۱۷

۱.۲ پدیده بستر

۱۸

۲.۲ ویژگیهای هندسی و اثرهای انتقالی آنها

۱۹	۳.۲ حرکت عرضی بستر
۲۳	۴.۲ مشاهدات تجربی درباره رفتار جریان عرضی
۲۵	۵.۲ حرکت محوری
۲۷	۶.۲ زمان ماندگاری بی بعد

۳۱	فصل ۳ پدیده‌های آیرودینامیکی ناحیه آزاد
۳۳	۱.۳ جریان سیال در لوله‌ها: زمینه کلی
۳۸	۲.۳ معادلات پایه برای جریانهای واکنش دهنده چند جزئی
۴۰	۳.۳ پیدایش جت متلاطم
۴۳	۴.۳ جتهای محصور
۴۵	۵.۳ جتهای پیچ و تاب دار
۴۶	۶.۳ جتهای پیش رونده (فرفری)
۴۸	۷.۳ جت حامل ذرات
۵۰	۸.۳ رشته‌ای شدن جریان غبار
۵۲	۹.۳ فن مکنده القایی (ID-فن)

۵۵	فصل ۴ جریانهای دانه‌ای در کوره‌های دوار
۵۶	۱.۴ جریان ریزدانه‌ها (جریانهای دانه‌ای)
۵۹	۲.۴ معادلات حرکت برای جریانهای دانه‌ای
۶۲	۳.۴ رفتار جریان ذرات معلق در کوره‌های دوار
۶۳	۴.۴ مروری بر رفتار جریان موجود در استوانه دوار
۶۶	۱.۴.۴ مدل سازی جریان دانه‌ای در صفحه عرضی
۶۶	۵.۴ مدل جریان ذرات معلق در کوره‌های دوار
۶۷	۱.۵.۴ تشریح مدل
۶۸	۲.۵.۴ فرضهای ساده کننده
۶۸	۳.۵.۴ معادلات حاکم بر پایداری اندازه حرکت
۷۳	۴.۵.۴ معادله انتگرالی برای پایداری اندازه حرکت
۷۷	۵.۵.۴ حل معادله اندازه حرکت در لایه فعال بستر
۷۸	۶.۵.۴ نیمرخ سرعت در لایه فعال
۷۹	۷.۵.۴ نیمرخهای چگالی و دمای دانه‌ای

۸۱	۸.۵.۴ رابطه تحلیلی ضخامت لایه فعال
۸۲	۹.۵.۴ برنامه حل عددی برای معادله اندازه حرکت
۸۴	۶.۴ نتیجه‌های مدل و صحه‌گذاری آن
۸۵	۷.۴ کاربرد مدل جریان
۹۰	پیوست (الف).۴
۹۱	پیوست (ب).۴
۹۳	فصل ۵ آمیختگی و جدانشینی
۹۶	۱.۵ مدل‌سازی آمیختگی و جدانشینی ذرات در کوره‌های دوار
۹۸	۲.۵ مدل جدانشینی پستری
۱۰۰	۳.۵ معادلات حاکم بر جدانشینی
۱۰۳	۴.۵ شرایط مرزی
۱۰۴	۵.۵ حل معادله جدانشینی
۱۰۵	۱.۵.۵ سامانه جدانشینی کامل (حالت I)
۱۰۶	۲.۵.۵ آمیختگی شعاعی (حالت II)
۱۰۶	۳.۵.۵ آمیختگی و جدانشینی (حالت III)
۱۰۷	۶.۵ حل عددی معادلات حاکم
۱۰۸	۷.۵ صحه‌گذاری مدل جدانشینی
۱۰۹	۸.۵ کاربرد مدل جدانشینی
۱۱۴	پیوست (الف).۵
۱۱۴	پیوست (ب).۵
۱۱۹	فصل ۶ احتراق و شعله
۱۲۰	۱.۶ احتراق
۱۲۱	۲.۶ کسرهای مولی و جرمی
۱۲۳	۳.۶ شیمی احتراق
۱۲۴	۴.۶ عنصرسنجی عملی
۱۲۶	۵.۶ دمای شعله بی‌دررو
۱۲۷	۶.۶ انواع سوخته‌های به‌کار رفته در کوره‌های دوار
۱۲۸	۷.۶ انواع زغال سنگ، رده‌بندی و تجزیه آنها

۱۲۹	۸.۶ احتراق کک نفتی
۱۳۰	۹.۶ احتراق لاستیک قراضه (تایرهای فرسوده)
۱۳۲	۱۰.۶ اشتعال گردسوخست (زغال سنگ یا کک) در کوره‌ها
۱۳۳	۱۱.۶ تغذیه گردسوخست و سامانه‌های اشتعالی
۱۳۶	۱۲.۶ برآورد مقدار هوای لازم برای احتراق
۱۳۶	۱۳.۶ سینتیک واکنش ذرات کربن
۱۳۸	۱۴.۶ اشتعال سوخت مایع
۱۴۱	۱۵.۶ مدل سازی احتراق
۱۴۲	۱۶.۶ مدل سازی تجسمی جریان (مدل سازی اسیدی - قلیایی)
۱۴۴	۱۷.۶ مدل سازی ریاضی CFD
۱۴۶	۱۸.۶ معادلات وابستگی پارامتری برای مدل سازی CFD
۱۴۷	۱۹.۶ معادلات وابستگی فیلد ذره برای مدل سازی CFD
۱۴۸	۲۰.۶ مدل سازی ذرات خروجی
۱۴۸	۱.۲۰.۶ مدل سازی نیتریک اکسید (NO_x)
۱۵۰	۲.۲۰.۶ مدل سازی کربن مونوکسید (CO)
۱۵۰	۲۱.۶ ارزیابی CFD مشعل گردسوخست کوره دوار
۱۵۸	پیوست ۶. (الف)

۱۶۱	فصل ۷ انتقال گرما در ناحیه آزاد
۱۶۲	۱.۷ بررسی سازوکارهای انتقال گرما
۱۶۳	۲.۷ انتقال گرمای رسانشی
۱۶۸	۳.۷ انتقال گرمای همرفتی
۱۶۹	۴.۷ مسائل رسانشی-همرفتی
۱۷۱	۵.۷ اتلافهای بدنه
۱۷۱	۶.۷ مدل دیواره نسوز
۱۷۴	۷.۷ رسانش گرمایی در دیواره کوره دوار
۱۷۶	۸.۷ انتقال گرمای تابشی
۱۷۶	۱.۸.۷ مفهوم جسم سیاه
۱۷۸	۹.۷ ضریبهای شکل تابشی
۱۸۰	۱۰.۷ تبادل تابشی میان سطوح خاکستری چندگانه

- ۱۱.۷ اثر تابشی گازهای احتراق
۱۸۱
۱۲.۷ ضریبهای انتقال گرمای تابشی در ناحیه آزاد کوره دوار
۱۸۲
۱۳.۷ تبادل تابشی از گاز ناحیه آزاد به بستر روباز و سطوح دیواره
۱۸۴
۱۴.۷ انتقال گرمای تابشی میان سطوح روباز ناحیه آزاد
۱۸۴

- فصل ۸ فرایندهای انتقال گرما در بستر کوره دوار
۱۸۹
۱.۸ انتقال گرما میان دیواره پوشیده و بستر
۱۹۱
۲.۸ مدل نفوذ اصلاح شده برای انتقال گرمای دیواره به بستر در کوره دوار
۱۹۱
۳.۸ رسانندگی گرمایی مؤثر در بسترهای توده مواد
۱۹۴
۴.۸ رسانندگی گرمایی مؤثر در بستر چرخان
۱۹۸
۵.۸ مدل سازی گرمایی فرایندهای کوره دوار
۱۹۹
۶.۸ تشریح مدل گرمایی
۱۹۹
۷.۸ مدل گرمایی یک بعدی بستر و ناحیه آزاد
۲۰۰
۸.۸ مدل گرمایی دوبعدی بستر
۲۰۴
۹.۸ مدل مرکب محوری و مقطعی - مدل شبه سه بعدی بستر
۲۰۶
۱۰.۸ شیوه حل
۲۰۷
۱۱.۸ نتایج و کاربرد مدل
۲۱۰
۱۲.۸ مدل سازی انتقال گرمای تک ذره برای فراوری شیل آماس کرده
۲۱۳

- فصل ۹ موازنه جرم و انرژی
۲۲۱
۱.۹ ترمودینامیک شیمیایی
۲۲۲
۲.۹ انرژی آزاد گیبس و آنتروپی
۲۲۲
۳.۹ موازنه کلی گرما و ماده
۲۲۴
۴.۹ مدل گرمایی برای سامانه واکنشی شیمیایی
۲۲۵
۵.۹ دروندادهای موازنه جرم
۲۲۶
۶.۹ ترکیبات شیمیایی
۲۲۷
۷.۹ دروندادهای موازنه انرژی
۲۲۷
۸.۹ ارزیابی خط تولید - متغیرهای اندازه گیری شده
۲۲۷
۹.۹ محاسبات اتلاف بذنه گرما
۲۳۱
۱۰.۹ محاسبه مدل نکلیس
۲۳۱

۲۳۱	۱۱.۹ احتراق
۲۳۸	۱۲.۹ منول موازنه انرژی
۲۳۹	۱۳.۹ انرژی محسوس برای جریانهای خروجی
۲۴۵	فصل ۱۰ کاربرد کوردهای دوار در فراوری کانیها
۲۴۶	۱.۱۰ آهک سازی
۲۴۶	۲.۱۰ تجزیه سنگ آهک (تکلیس)
۲۵۱	۳.۱۰ کوره دوار آهک
۲۵۲	۴.۱۰ فرایند سیمان سازی
۲۵۳	۵.۱۰ شیمی فرایند سیمان
۲۵۵	۱.۵.۱۰ منطقه تجزیه
۲۵۶	۲.۵.۱۰ منطقه گذار
۲۵۶	۳.۵.۱۰ منطقه تف خوشی
۲۵۷	۶.۱۰ مصرف انرژی در کوره دوار سیمان
۲۵۹	۷.۱۰ فرایندهای احیای کانه در کوردهای دوار
۲۵۹	۱.۷.۱۰ فرایند SL/RN در کوره دوار
۲۶۱	۲.۷.۱۰ تشویه مواد تیتانی آهن دار
۲۶۳	۸.۱۰ فرایند تولید سنگ دانه های سبک در کوره دوار
۲۶۶	۱.۸.۱۰ مشخصات مواد اولیه LWA
۲۶۶	۲.۸.۱۰ کانی شناسی مواد اولیه LWA
۲۶۹	۳.۸.۱۰ سرگذشت گرمایی LWA
۲۷۵	پیوست
۳۱۹	واژه نامه انگلیسی - فارسی
۳۳۵	واژه نامه فارسی - انگلیسی
۳۵۳	فهرست راهنما

مقدمه مترجم

با وجود انتشار مقالات و کتابهای ارزنده فراوان در زمینه صنعت سیمان و علی‌رغم گذشت ۷۷ سال از تاریخ احداث نخستین کارخانه سیمان در کشور، کمبود (و شاید نبود) نوشته‌ها و کتابهای علمی در زمینه صنعت سیمان و به‌ویژه قلب پرتیش و برحرارت این صنعت یعنی کوره دوار کاملاً محسوس است. بررسی جامع ترمودینامیک - آبرودینامیکی کوره‌های دوار یکی از نیازهای اساسی برای هر متخصص و دانش‌آموخته شاغل در صنعت سیمان است. افزایش دانسته‌های علمی مهندسان شاغل در واحدهای فنی - مهندسی کارخانه‌های سیمان و بهره‌برداران خطوط تولید این کارخانه‌ها در این زمینه ضرورتی گریزناپذیر است.

این کتاب مشتمل بر ده فصل همراه با پیوستها و جدولهای کاربردی لازم، همه موضوعهای مربوط به کوره دوار به اضافه دهها موضوع علمی - فنی دیگر را دربر می‌گیرد که در نوع خود و در میان کتابهای موجود در این زمینه در زمره بهترینهاست.

در حین ترجمه این کتاب تماسهایی از طریق ایمیل، نامه و تلفن با مؤلف گرفته شد که در فرایند برگردان مطالب به زبان مادری بسیار سودمند واقع شد. در پایان از شرکت صنایع سیمان غرب و مؤسسه انتشارات دانشگاه صنعتی شریف به‌خاطر همکاری در ترجمه و انتشار این کتاب قدردانی می‌شود.

مسعود رضا شاکری

زمستان ۱۳۹۰

پیشگفتار مؤلف

در روستای کوچکی در غنا که امروزه در حومه کوماسی پایتخت آشنی^۱ قرار دارد، به دنیا آمدم. پس از گذراندن دوره‌ای کوتاه به عنوان کارآموز مهندسی در ناوگان کشتیرانی غنا، موفق به اخذ بورسیه در رشته مهندسی دریانوردی از اتحاد شوروی سابق شدم. با تغییر رشته، مطالعات خود را در مهندسی مکانیک در مسکو ادامه دادم و در ترمودینامیک و مبرورهای حرارتی تخصص یافتم، به طوری که طراحی موتور توربو-پراپ را برای استفاده در قایق پرنده تغییر دادم. تحصیلات خود را در کانادا ادامه دادم و پس از آن کارشناسی ارشد خود را در مکانیک سیالات گرمایی از دانشگاه نیوبرنزویک دریافت کردم. موضوع پایان نامه من درباره پایستگی انرژی در گلخانه‌ها با استفاده از حفاظهای گرمایی در شب، برای جلوگیری از اتلاف گرمای تابش فروسرخ از طریق سقفهای پلی اتیلنی در دماهای پایین در شبها بود. کرسی هیئت علمی را به خاطر همسر من که از اهالی آما بود در دانشگاه گویان در آمریکای جنوبی پذیرفتم و به تدریس ترمودینامیک و انتقال گرما در دوره کارشناسی پرداختم. پژوهش من در زمینه تبدیل شیمی گرمایی بستر سیال حاوی سبوس برنج برای تولید زیست انرژی و استفاده از خاکستر آن در صنعت سیمان، اعطای هزینه پژوهش یک ساله‌ای را در آزمایشگاه دانشکده مهندسی شیمی در دانشگاه کانزاس در پی داشت. پس از دعوت به کانادا، در مرکز مهندسی مایند متاورژی در دانشگاه بریتیش کلمبیا دکترای خود را در زمینه کوره‌های دوار با پشتیبانی مالی کانادا گرفتم. رساله من تحت عنوان پدیده‌های انتقال در کوره دوار و مطالعه حرکت بستر و انتقال گرما در زمره پژوهشهای پیشگام در زمینه کاربرد نظریه‌های جریان دانه‌ای در مدل سازی توزیع سرعت ذره در کوره‌های فراوری کانی بود؛ از این رهگذر، امکان حل مسئله انتقال گرما در درون بستر کوره به طور کافی و کامل به وجود آمد. پس از گذراندن دوره‌ای کوتاه به عنوان استادیار در دانشکده اسوارت مور^۲ در پنسیلوانیا، در شرکت سالیٹ (شرکت تولیدکننده سنگ دانه‌های سبک به وسیله کوره دوار در ویرجینیا) به عنوان مهندس تولید و پژوهش مشغول به کار شدم. در این شرکت، یک دست نامه آموزشی دو بخشی درباره پدیده‌های انتقال در کوره دوار در قالب پروژه ۱۰-۱۰-۱۰ برای افزایش تولید ۱۰ درصدی، بهبود کیفیت ۱۰ درصدی و همچنین کاهش مصرف سوخت ۱۰ درصدی تهیه کردم. پس از سازماندهی دوباره این شرکت در سال

۱۹۹۷، به پنسیلوانیا بازگشتم و به گروه فناوری احتراق و سوخت (FCT)^۱ پیوستم و به کارهای پژوهشی درباره احتراق کوره و روشهای بهینه‌سازی مشعلهای پخش متلاطم برای سازگاری با فرایندهای کوره سیان و آهک مشغول شدم. پس از انتقال مالکیت FCT به شرکت بلوسیرکل سنت^۲، به گروه فرایند کانیهای FFE^۳ (کانی‌های FLS^۴ فعلی) پیوستم و چندین پروژه بزرگ در زمینه طراحی کوره‌های شعله - مستقیم فناوری کانی از جمله تکالیس سنگ‌آهک، استخراج و انادایوم، تولید خاکستر سودا و جز آن را راهبری کردم. سپس در شرکت دیگری مشغول کار شدم که پیش‌تاز سازندگان کوره‌های دوار دما بالا با گرمایش غیرمستقیم برای کاربردهای خاص از جمله مواد غیرآلی بود. پس از آن، به‌عنوان مشاور صنعتی در امور فرایندی و آموزشی در انجمن کوره دوار خدمات شایان توجهی ارائه نمودم و ملقب به دکتر کوره شدم. اینک، به‌عنوان دانشمندی برجسته در مرکز خدمات پژوهشی کشاورزی USDA به پژوهش‌های خود در زمینه زیست سوختها و زیست انرژی ادامه می‌دهم. کوره‌های دوار: پدیده‌های انتقال و فرایندهای انتقال، خطه اوج پژوهشهای من در کوره‌های دوار از دو جنبه علمی و صنعتی است و شامل تجربه‌های توسعه در تولید، طراحی فرایند، راه‌اندازی، و از همه مهمتر کوششهای من برای ایجاد پیوند بین کلاس درس و صنعت کوره دوار است. تمرکز کوره‌های دوار: پدیده‌های انتقال و فرایندهای انتقال روی تربیت مهندس فرایند و پژوهشگر در این شاخه کاری و تشریح کمی درباره پدیده‌های انتقال از جمله برهم‌کنشهای فرایند ناحیه آزاد و بستر است. عامل اخیر شامل ترکیبی از حرکت عرضی بستر و جانشینی مواد دانه‌ای و اثا حاصل از این پدیده‌ها بر روی انتقال گرمای بستر است. هرچند دیگر پدیده‌های بستر، همچون جانشینی محوری (لایه‌بندی بیایی ذرات ریز و درشت در طول کوره) و انباشت (ته‌نشینی یا رشد مواد بر روی دیواره نسوز که موانع ناخواسته‌ای را به‌وجود می‌آورد) هنوز به خوبی درک نشده‌اند، اما آنها را تنها به‌صورت کیفی تشریح کرده‌اند. در هر حال، این پدیده‌ها را پس از تشریح دقیق حرکت عرضی بستر، جانشینی و انتقال گرما بهتر می‌توان توضیح داد. این کتاب را به عنوانی تقسیم کرده‌ام که با تشریح مبانی کارکرد کوره دوار شروع می‌شود و به جریان سیال در کوره‌های دوار، همراه با معرفی پدیده ناحیه آزاد، می‌رسد. در اینجا برای تشریح ویژگیهای جریانهای محصور که خود را در احتراق و شعله‌های موجود در کوره‌های دوار نشان می‌دهند، از شباهتهای جریان سیال در مجراها استفاده شده است. در فصل ۴، پدیده جریان ریزدانه‌ها در کوره دوار بیان شده است. کوره‌های دوار، غالباً مواد در حال فراوری شامل دانه‌ها هستند، از این‌رو نظریه‌های حاکم بر این‌گونه جریانها برای حرکت بستر، واکنشهای گاز - جامد و واکنشهای جامد - جامد که در بستر رخ می‌دهند، اهمیت دارند. با آگاهی از این جریانها، منطقی است که به مسائل آمیختگی و جانشینی مبتلا به کوره‌های دوار پرداخته شود. به این موضوع در فصل ۵ به‌طور کامل پرداخته شده است. شدت پدیده‌های آمیختگی تأثیر عمده‌ای روی کیفیت فراورده می‌گذارد، زیرا رفتار گرمایی هرگونه مواد دانه‌ای را تحت تأثیر

1. Fuel and Combustion Technology 2. Blue Circle Cement 3. Fuller-FL Schuidt
4. FLS Minerals in Bethlehem, PA

آمیختگی و جدانشینی محدوده تقسیم‌بندی کوره دوار را در گروه واکنشگرهایی با تلاطم پیوسته تعیین می‌کنند. شعله، قلب کوره‌های شعله - مستقیم است، بنابراین به احتراق و شعله در فصل ۶ پرداخته شده است. انواع شعله‌های موجود در کوره‌های دوار به توزیع جریان در ناحیه آزاد بستگی دارد که به نوبه خود تعیین‌کننده شارهای گرمایی به خوراک کوره و همچنین گازهای خروجی است. بنابراین، عملیات انتقال گرما در ناحیه آزاد دارای زنجیره‌ای منطقی است و این موضوع در فصل ۷ با مرور اصول انتقال گرمای فرایندی بیان شده است. پیش از این، برای تشریح انتقال گرمای ناحیه آزاد در کوره‌های دوار از مدل‌های ریاضی متعددی از جمله مدل‌های منطقه‌ای یک‌بعدی و دینامیک سیال محاسباتی دو، و سه‌بعدی (CFD) استفاده می‌شد که به برخی از آنها همراه با پیشرفتهای اخیر اشاره شده است. در فصل ۸ به رفتار ناحیه آزاد پس از انتقال گرمای بستر پرداخته شده است. مشابه با انتقال گرمای بستر ثابت، انتقال گرمای بستر کوره دوار شامل ترکیبی از رسانش ذره‌به‌ذره، همرفت و تابش است. اما همراه با این پدیده، مؤلفه انتقال فراورشی وجود دارد که ناشی از جریان ریزدانه‌هایی است که انتقال گرمای کوره دوار را از انتقال گرمای بستر بوده مواد جدا می‌سازد. در اینجا، برخی از مدل‌های موجود بستر توده مواد، و تعمیم آنها برای کوره‌های دوار بیان شده‌اند. پس از انتقال گرمای بستر، موازنه جرم و انرژی با بررسی کارکرد کوره به عنوان سامانه‌ای ترمودینامیکی که با اتمسفر برهم‌کنش دارد، در فصل ۹ آورده شده است. در این فصل، از موازنه ساده جرم و انرژی برای کوره آهک استفاده شده است. با توجه به مطالب بالا منطقی است که به برخی از کاربردهای خاص فراوری کانی با محوریت کوره دوار در فصل ۱۰ اشاره شود. بعضی از این فرایندها که درباره آنها بحث شده است، عبارت‌اند از آهک‌سازی، سیمان‌سازی، کوره‌های احیای کربن - گرمایی و کوره‌های تولیدکننده سنگ‌دانه‌های سبک. من به خیل دانشجویانی که در دانشگاه‌های محل تدریس تحصیل می‌کنند و همچنین شاغلان واحدهای صنعتی که در آنجا سخنرانی داشته‌ام، مدیون هستم. از شرکت سالیته برای اعطای فرصت بی‌نظیری که امکان آزمایش نظریه‌ها و مدل‌های ریاضی مرا روی فرایندهای کوره‌های دوار بزرگ موجود آورد، سپاسگزارم. همچنین خود را مدیون شرکتهای FLS، FCT، Harper و همه اعضای خانواده بزرگ بهره‌برداران کوره‌های دوار و کسانی می‌دانم که به من آموزشی بی‌نظیر فراتر از کلاس درس دادند. سرانجام، مراتب قدردانی خود را از دکتر فیلیپ شاو، دکتر گوس ناتان و دکتر پیتروکوک برای بازخورد مستفادانی که روی نسخه دست‌نویس این کتاب داشته‌اند، اعلام می‌دارم.

ا.ا. بوتنگ

Royersford

aboaten1@gmail.com