



دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه زنجان

پایان نامه‌ی کارشناسی مهندسی برق - گرایش الکترونیک

شناسایی و مدل سازی سیستم چند متغیره کوره‌ی دوار

استاد راهنما: دکتر مهرداد بابازاده

نگارنده: کیانوش کریمی

زمستان ۱۳۹۶

تقدیم به

پروردگار بی نیازی که از شکرش عاجزم

با سپاس و قدردانی از استاد گران قدر، دکتر مهرداد بابازاده، دکتر محمدرضا یوسفی و خانم
مهندس تقیلو

فهرست

۴	فصل ۱: پیشینه
۴۳	فصل ۲: روش های بررسی شده
۶۱	فصل ۳: تابع تبدیل مقدار نهایی آزمایش ها
۷۴	فصل ۴: تابع تبدیل ثابت زمانی
۸۲	فصل ۵: تابع تبدیل تاخیر
۹۲	فصل ۶: تابع تبدیل کلی
۹۶	چکیده
۹۹	مراجع:

فصل ۱: پیشینه

استوانه‌های دوار نقش مهمی در تولید مواد شیمیایی در صنعت دارند. این دستگاه‌ها در صنایع فرایندی مهمی نظیر کوره‌های دوار، خشک‌کن‌های دوار، خنک‌کن‌های دوار و کلسیناتورهای دوار کاربرد دارند. در این تجهیزات امکان برقراری تماس، انتقال حرارت و انتقال جرم مابین فازهای جامد و گاز وجود دارد. در بسیاری از موارد این دستگاه‌ها مجهز به بالابر مواد هستند تا انتقال حرارت بهتر انجام شود. در این رساله بررسی حرکت مواد در استوانه‌های ساده فاقد بالابر مواد مدنظر می‌باشد. در چنین استوانه‌هایی بسته به اینکه شرایط عملیاتی دستگاه از لحاظ سرعت دوران، شیب و دبی خوراک ورودی به دستگاه چگونه تنظیم شود، رژیم‌های مختلفی از حرکت مواد در مقطع عرضی برقرار می‌گردد. بعضی از این رژیم‌ها عملاً در صنعت کاربردی ندارند. این رژیم‌ها با افزایش دبی جرمی مواد و سرعت دوران استوانه، به ترتیب شکل می‌گیرند. رژیم‌های ایجاد شده به‌قرار زیر می‌باشند: لغزشی^۱، ریزشی^۲، غلطشی^۳، آبشاری^۴، آبشاری بزرگ^۵، سانتریفیوژی^۶.

رژیم‌های مربوط به دبی جرمی و سرعت دوران خیلی کم و یا دبی جرمی خیلی زیاد و سرعت دوران بالا، عملاً در صنعت مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. مدل‌های متعددی توسط یکی از اساتید مهندسی شیمی دانشگاه زنجان^۷ مطرح شده است. مدل‌های مطرح شده را می‌توان به ترتیب زیر تقسیم‌بندی نمود:

(۱) مدل‌های پایا که در آن نمودار تغییرات عمق بستر مواد در طول استوانه دوار با توجه به پارامترهای عملیاتی، هندسی و خواص پودر بررسی شده است. این مدل‌ها بیشتر برای مقاصد طراحی و بهینه‌سازی عملیاتی دستگاه و فرایند کاربرد دارند.

1. Sliding
2. Rolling
3. Slumping
4. Cascading
5. Cataracting
6. Centrifuging
7. دکتر محمد رضا یوسفی.

۲) مدل‌های دینامیکی که در آن‌ها تغییرات عمق بستر مواد به صورت تابعی از طول استوانه و زمان مدنظر هست. این مدل‌ها بیشتر برای مقاصد کنترلی کاربرد دارند.

۳) مدل‌هایی که به بررسی اثر وجود مانع و گرفتگی در استوانه می‌پردازند. این مدل‌ها هم از دیدگاه پایا و هم از دیدگاه دینامیکی حائز اهمیت می‌باشند. در مراجع علمی وجود مانع معمولاً در انتهای استوانه مدنظر قرار گرفته است؛ اما به طور کلی در صنعت مسئله‌ای بنام گرفتگی در مقاطع داخلی استوانه نیز مطرح می‌باشد. به عنوان مثال تشکیل رینگ در ناحیه کلسیناسیون کوره‌های دوار سیمان که به واسطه تغییر نوع مواد و ترکیب درصد اجزاء خوراک ورودی به کوره اتفاق می‌افتد، مشکل بسیار بزرگی است که در اغلب کوره‌های دوار سیمان مشاهده می‌شود.

۴) مدل‌های گذرا برای بیان شرایط راه‌اندازی استوانه و پر شدن بستر مواد نیز از دیگر مسائل مدل‌سازی در این تجهیزات می‌باشد که در سیستم‌های فرایندی و به طور مشابه در استوانه‌های دوار کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علت این موضوع این نکته می‌باشد که مجموع مدت‌زمان لازم به منظور راه‌اندازی و بارگیری دستگاه، خیلی کمتر از زمان‌های مصرف‌شده در حین عملکرد عادی دستگاه می‌باشد. با این حال در دست داشتن مدل‌های مناسبی برای شرایط بارگیری دستگاه برای کنترل آن در این شرایط بسیار مفید است. در حال حاضر مدل‌های متعددی در مراجع برای مقاصد فوق ارائه شده است.

در تحقیقات قبلی با استفاده از داده‌های حاصل از یک دستگاه آزمایشگاهی به بررسی مفصل مدل‌های پایا و دینامیک حرکت مواد در استوانه‌های دوار پرداخته شده و میزان توانایی این مدل‌ها در بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی، هندسی و فیزیکی و همچنین تطابق نتایج حاصل از مدل‌ها و داده‌های آزمایشگاهی برای نواحی مختلف استوانه دوار بررسی شده است. در ادامه شرح مفصلی از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده به همراه مشخصات آن و همچنین توضیحات کامل از تکنیک‌های ریاضی و روش‌های محاسباتی بکار رفته در جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی و انجام مدل‌سازی فرایند ارائه شده است. مدل‌سازی‌های انجام گرفته قبلی را در چند بخش اصلی می‌توان طبقه‌بندی کرد. در بخش اول با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مدل‌گذاری مربوط به شرایط بارگذاری و راه‌اندازی دستگاه ارائه شده است. این

مدل توانایی بررسی اثر پارامترهای عملیاتی، هندسی و خواص فیزیکی پودر بر نحوه حرکت و تغییرات ارتفاع بستر مواد تا لحظه رسیدن به حالت پایا را دارا می‌باشد. با استفاده از مقادیر پایای ارتفاع بستر مواد که از مدل ارائه شده به دست آمده است، می‌توان به بررسی خطای مدل‌های پایای موجود در مراجع در موقعیت‌های مکانی مختلف استوانه نیز پرداخت. در بخش دوم بررسی تئوریک کاملی بر روی مدل دینامیکی حرکت مواد انجام شده است. برای این منظور از یک مدل گذرای ارائه شده در مراجع که به‌طور کلی نمودار تغییرات عمق بستر مواد را به‌صورت تابعی از طول و زمان ارائه می‌دهد استفاده شده است. در این بخش ساختارهای مختلف غیرخطی مدل دینامیکی سیستم استخراج و نشان داده شده است که هر یک از این ساختارها برای چه شرایطی از شیب استوانه قابل استفاده هستند. به‌طور کلی ساختارهای مدل دینامیکی برای سه دامنه از شیب استوانه شامل شیب‌های خیلی کم و شیب‌های متوسط و شیب‌های خیلی زیاد ارائه شده است. ساختار حاصل از شیب‌های کم، از گذشته در مراجع مورد توجه بوده است؛ اما ساختار شیب متوسط را می‌توان به‌عنوان نوآوری تحقیقات انجام شده‌ی اخیر تلقی نمود. که این پایان نامه نیز با هماهنگی مبتکر آن^۷ و بر مبنای اطلاعات به دست آمده از نتایج آن تحقیقات انجام شده است. برای بررسی ساختار حاصل از شیب‌های متوسط، مدلی خطی دو پارامتری ارائه شده است که شناسایی و تخمین پارامترها و مطابقت دادن داده‌ها با مدل ارائه شده به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۸ (PSO) انجام شده است. در بخش سوم با توجه به محدودیت‌های استفاده از حسگرهای نوری در بعضی قسمت‌های استوانه دوار مانند انتهای تخلیه و نواحی نزدیک به خوراک دهنده، برای بررسی و تشخیص نحوه تغییرات انباشتگی مواد در این نواحی و همچنین قسمت‌های مختلف استوانه دوار از تکنیک پردازش تصویر و روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شده است. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به حالت پایای ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه استوانه دوار و با استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) شرط مرزی مدل کرامر تصحیح شده است. همچنین با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به حالت پایای ارتفاع بستر مواد در طول استوانه دوار، مدل اصلاح شده‌ای بر

دکتر محمدرضا یوسفی، 7.

مبنای مدل کرامر که شامل ۴ پارامتر اضافی نسبت به این مدل می‌باشد، ارائه شده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۸ (GA) پارامترهای مدل اصلاح شده تعیین شده است.

به‌طور کلی موضوعات مورد بررسی در تحقیقات اخیر را می‌توان به شرح زیر تفکیک نمود.

(۱) بررسی روند تغییرات ارتفاع بستر مواد تحت تاثیر تغییرات پارامترهای عملیاتی، هندسی و خواص فیزیکی پودر برای مواد با دانه‌بندی بسیار ریز (در مراجع معمولاً دانه‌بندی مواد مورد استفاده، درشت‌تر می‌باشد).

(۲) بررسی و مشخص کردن میزان خطای مدل پایای ارائه شده برای حرکت مواد در استوانه‌های دوار برای مواد با دانه‌بندی ریز.

(۳) ارائه یک مدل گذرا^۸ برای بیان شرایط بارگذاری مواد و راه‌اندازی دستگاه که به کمک این مدل خطای مدل پایا نیز بررسی شده است.

(۴) ارائه ساختارهای مختلفی از مدل دینامیکی بستر مواد برای کاربرد در شیب‌های مختلف استوانه و ارائه مدلی خطی برای شیب‌های متوسط.

(۵) ارائه مدلی با استفاده از روش SVR، برای بیان تغییرات عمق بستر مواد و نحوه حرکت نوک پودر در سرتاسر استوانه. این مدل توانسته است تغییرات عمق بستر مواد در سرتاسر استوانه را با دقت بسیار مناسب‌تری بیان نماید.

ارائه مدل اصلاح شده بر پایه مدل کرامر که تطابق بهتر با داده‌های آزمایشگاهی در محدوده پارامترهای عملیاتی و در موقعیت‌های مکانی مختلف استوانه دوار به‌خصوص انتهای تخلیه را دارا می‌باشد.

⁸ Transient model

جریان توده‌ی جامد

توده‌ی مواد جامد در مسیری پیچیده در استوانه‌های دوار جریان دارد که این جریان شامل جزء محوری (به سبب گرانش) و جزء شعاعی (به سبب دیواره چرخان کوره) است. هر دو جزء از اهمیت و تأثیر بسزایی بر نحوه جریان مواد جامد و عملکرد استوانه‌های دوار برخوردارند.

جریان توده‌ی جامد در جهت محوری

ضروری است که حرکت توده‌ی مواد جامد در جهت محوری برای تعیین زمان ماندگی مواد جامد در استوانه دوار بررسی شود. به‌طور مثال در کوره‌های دوار سیمان، زمان ماندگی توده‌ی مواد جامد مستقیماً در تشکیل کلینکر تأثیر داشته و تعیین دقیق آن بسیار حائز اهمیت است. حرکت محوری توده‌ی مواد جامد در استوانه‌های دوار به شار جرمی مواد، سرعت دوران استوانه، ارتفاع بستر مواد (درصد پر بودن)، اندازه‌ی ذرات، زاویه ریزش مواد و شیب استوانه دوار بستگی دارد. سرعت محوری توده‌ی جامد در طول استوانه دوار تغییر کرده و تغییرات ارتفاع بستر را به وجود می‌آورد. بیشتر مدل‌های موجود در شبیه‌سازی کوره‌های دوار، مخصوصاً کوره‌های دوار سیمان، ارتفاع بستر و (در نتیجه سرعت محوری) را در کوره ثابت فرض می‌کنند. فرض ثابت در نظر گرفتن ارتفاع بستر مواد، زمان ماندگی توده‌ی جامد را در کوره برای هر شرایط عملکردی، یکسان تعیین خواهد کرد. بنابراین، این چنین مدل‌هایی توانایی بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی، هندسی و خواص فیزیکی مؤثر بر عملکرد استوانه‌های دوار را نخواهند داشت و استفاده از آن‌ها با محدودیت‌هایی همراه خواهد بود. بنابراین ضروری است که روش‌هایی برای محاسبه دقیق حرکت محوری توده‌ی مواد جامد، وجود داشته باشد. آزمایش‌ها و مدل‌های محاسباتی بسیاری جهت پیش‌بینی حرکت محوری توده‌ی مواد جامد در کوره‌ها و استوانه‌های دوار در مراجع موجود می‌باشد. از آن جمله می‌توان به تحقیقات فریدمن و مارشال^۹ (۱۹۴۹)،

^۹ . Friedman and Marshall.

کرامر و کروکویت^{۱۰} (۱۹۵۲)، پرون و بویی^{۱۱} (۱۹۹۰)، اسپورلینگ و همکارانش^{۱۲} (۲۰۰۰) اشاره کرد. از تحقیقات دیگر در این زمینه می‌توان به بررسی‌های لیباس و همکارانش^{۱۳} (۱۹۹۵) بر روی داده‌های تجربی مربوط به زمان ماندگی، حرکت اجزا و پروفیل عمق بستر مواد در کوره‌های دوار با قطر ۰/۶ متر اشاره کرد. اسپورلینگ و همکارانش نیز تغییرات ارتفاع بستر مواد جامد در کوره‌ای با قطر ۰/۱ متر را گزارش کرده‌اند. هر دو سری از داده‌های منتشرشده با مدل کرامر مقایسه شده‌اند. مدل کرامر رابطه بین دبی حجمی توده‌ی مواد جامد با شیب استوانه، زاویه‌ی ریزش مواد، شعاع استوانه، سرعت چرخشی و ارتفاع توده‌ی مواد جامد را بیان می‌کند. تلاش‌های انجام‌گرفته توسط اسپورلینگ و همکارانش (۲۰۰۱) و ماجومدار^{۱۴} (۲۰۰۸) برای تأیید مدل کرامر با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این مدل توانایی پیش‌بینی تغییر ارتفاع بستر مواد با تغییر سرعت دوران استوانه دوار و میزان دبی جرمی جامد ورودی در حالت پایا را داشته و نسبت به سایر مدل‌های منتشرشده در کوره‌های دوار، دقت قابل قبولی دارد. با توجه به دلایل ذکرشده، در بررسی‌های انجام‌شده بر روی داده‌های آزمایشگاهی و همچنین مقایسه نتایج مدل‌سازی انجام‌شده، از مدل کرامر و همکاران استفاده شده است.

جریان توده‌ی جامد در جهت عرضی

به‌غیراز بررسی حرکت توده‌ی مواد جامد در جهت محوری، ضروری است که حرکت توده‌ی مواد جامد در جهت عرضی نیز مدل شود. روش‌های مختلفی برای آنالیز حرکت عرضی توده‌ی مواد جامد در کوره‌های دوار مورد استفاده قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) انتقال مرحله محدود^{۱۵}

¹⁰ . Kamers and Croolcewit.

¹¹ . Perron and Bui.

¹² . Spurling et al.

¹³ . Lebas et al.

¹⁴ . Mujumdar.

¹⁵ . Finite Stage transport

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

مراجع:

- ۱- داده‌ی آزمایش‌های صورت گرفته توسط دکتر محمد رضا یوسفی، عضو هیئت علمی مهندسی شیمی دانشگاه زنجان
- ۲- داده‌های نرمالیزه شده و مرتب شده توسط دکتر مهرداد بابازاده، عضو هیئت علمی مهندسی برق دانشگاه زنجان
- ۳- شناسایی سیستم، دکتر مهدی کراری، استاد دانشکده‌ی مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیر کبیر
- ۴- مدل سازی حرکت مواد در کوره های دوار سیمان در شرایط گرفتگی، دکتر محمد رضا یوسفی، دکتر منصور شیروانی، دکتر محسن یاوری
- ۵- THE TRANSIENT RESPONSE OF GRANULAR FLOWS IN AN INCLINED ROTATING CYLINDER, R. J. SPURLING, J. F. DAVIDSON and D. M. SCOTT
Department of Chemical Engineering, University of Cambridge,
Cambridge, UK
- ۶- Nonlinear system identification from classical approaches to neural network and fuzzy models, Oliver Nelles
www.mathworks.com