

## مدل اصلاح شده حرکت مواد در استوانه‌های دوار

محمدرضا یوسفی

زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

سلمان موحدی‌راد، منصور شیروانی\*<sup>+</sup>

تهران، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی شیمی

**چکیده:** در این مقاله با استفاده از داده‌های به دست آمده از یک پایلوت آزمایشگاهی استوانه دوار شفاف یک مدل اصلاح شده، در شرایط پایا، برای بیان تغییرهای ارتفاع بستر مواد نسبت به طول استوانه دوار ارایه شده است. ساختار مدل اصلاح شده بر مبنای مدل حالت پایایی موجود در مراجع و شامل ۴ پارامتر اضافی نسبت به آن می‌باشد. توسعه مدل شامل دو بخش است. در بخش اول با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه و با استفاده از روش برازش بردار پشتیبان (SVR) شرط مرزی مدل اولیه تصحیح شده است، سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع پایایی بستر مواد در طول استوانه و با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) پارامترهای مدل اصلاح شده تعیین شده‌اند. برای اندازه‌گیری و تشخیص چگونگی تغییر انباشتگی مواد در ناحیه‌های گوناگون استوانه از فناوری پردازش تصویری استفاده شده است. مدل اصلاح شده در تمامی بازه‌ی پارامترهای عملیاتی و طراحی به ویژه در شیب‌های بالا و سرعت دوران پایین استوانه و همچنین در انتهای تخلیه مواد که مدل اولیه برای آن انحراف زیادی از واقعیت را نشان می‌دهد، تطابق بسیار مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. میانگین مربعات خطای مدل اولیه در مقایسه با مدل اصلاح شده نسبت به داده‌های جمع‌آوری شده از سرتاسر طول استوانه از مقدار ۰,۱۲۲ به مقدار ۰,۰۱۴ کاهش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** استوانه‌های دوار؛ عمق بستر مواد؛ مدل پایا؛ مدل اصلاح شده.

**KEYWORDS:** Rotary drums; Bed depth of material; Steady state model; Modified model.

### مقدمه

در استوانه دوار دارد. به‌طور نمونه در کوره‌های دوار سیمان، حرکت محوری و زمان اقامت مواد تأثیر مهمی بر کیفیت کلینکر و فراورده‌ی تولیدشده دارد [۲]. حرکت محوری مواد در استوانه‌های دوار به پارامترهای عملیاتی بسیاری شامل شدت جریان جرمی ورودی به استوانه، شیب و سرعت دوران استوانه، ارتفاع بستر مواد (میزان پرشدگی) و ویژگی‌های فیزیکی مواد از جمله دانسیته،

جریان مواد در استوانه‌های دوار شامل الگوهای جریانی پیچیده‌ای می‌باشد. این پیچیدگی به سبب حرکت‌های محوری و عرضی مواد در استوانه‌های دوار می‌باشد که ناشی از چرخش استوانه و اثرهای جاذبه است. این نوع حرکت‌ها تأثیر زیادی بر روی الگوهای جریانی ایجادشده و عملکرد دستگاه دارند [۱]. حرکت محوری مواد اهمیت به‌سزایی در محاسبه زمان اقامت مواد

\*عقد دار مکاتبات

+E-mail: shirvani.m@iust.ac.ir



در بازه‌ی ۳ تا ۳۰ درصد سرعت بحرانی ظاهر می‌شوند. در سرعت‌های دورانی زیاد الگوهای جریانی Catecting و Centrifuging ایجاد می‌شوند که کاربرد صنعتی ندارند. سرعت بحرانی با استفاده از معادله (۵) محاسبه می‌شود [۱۷].

$$n_c = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (5)$$

در انجام آزمایش‌ها سعی شده است تا پارامترهای عملیاتی طوری انتخاب شوند تا الگوهای جریانی ایجادشده در بازه‌ی الگوهای جریانی (Slumping, Rolling, Cascading) قرار گیرد.

### بخش تجربی دستگاه آزمایشگاهی

دستگاه آزمایشگاهی که برای بررسی تأثیر تغییر پارامترهای عملیاتی و هندسی بر چگونگی حرکت مواد و تغییر ارتفاع بستر در استوانه دوار ساخته شده است مجهز به یک لوله شفاف پلاستیکی شیب‌دار به طول ۱٫۹۵ متر و با قطر داخلی ۱۴ سانتیمتر می‌باشد که شیب آن قابل تنظیم و تغییر است. سرعت دوران و همچنین میزان شدت جریان جرمی ورودی به استوانه دوار نیز به صورت کنترل‌شده‌ای قابل تنظیم می‌باشد. تجهیزهای جنبی دستگاه شامل مخزن‌های ذخیره و تخلیه مواد، دو عدد سیکلون غبارگیر، فن مکنده مجهز به فیلتر، لوله‌کشی‌ها و شیرآلات مربوطه می‌باشد. موتورهای خوراک دهنده، دوران دهنده و همچنین موتور تنظیم‌کننده شیب با استفاده از PLC<sup>(۵)</sup> کنترل می‌شوند. از اتاق تاریک در اطراف استوانه برای جلوگیری از تأثیر نورهای محیطی مزاحم در هنگام تصویربرداری استفاده شده است.

### آزمایش‌ها

هدف از انجام آزمایش‌ها جمع‌آوری داده‌های آزمایشی مربوط به ارتفاع بستر مواد در شرایط پایا به منظور محاسبه پارامترهای مدل اصلاح شده است.

### شرایط عملیاتی و مواد مورد استفاده

بررسی ایجاد شرایط پایا در استوانه با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی که در انتهای تخلیه استوانه قرار می‌گیرد امکان‌پذیر شده است.

برابر قطر یک ذره در نظر گرفته است ( $h_o = d_p$ ). اسپکت و همکاران<sup>(۱)</sup> [۱۰] نیز نشان دادند که مقدار ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه بسیار بزرگ‌تر از قطر یک ذره می‌باشد و با تعریف عدد بی‌بعد "Bed Depth Number" به بررسی این موضوع پرداخته‌اند ولی مدل جدیدی برای شرایط مرزی جدید خود توسعه نداده‌اند [۱۰]. لیاس و همکاران<sup>(۲)</sup> [۱۱] داده‌های آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع بستر مواد در استوانه دوار به قطر ۰٫۶ متر را منتشر و با نتیجه‌های مدل K-C مقایسه کرده‌اند. این پژوهش‌ها به شکل همانند توسط موحوملار<sup>(۳)</sup> [۱۲] نیز انجام شده و تأثیر پارامترهای عملیاتی بر ارتفاع بستر مواد بررسی شده است. هر دو گروه داده‌های آزمایشگاهی مربوط به لیاس و موحوملار تطابق به نسبت مناسبی با مدل K-C را نشان داده‌اند. یوسفی و شیروانی<sup>(۴)</sup> [۱۳] با استفاده از یک پایلوت آزمایشگاهی، خطای مدل K-C و همکاران با داده‌های آزمایشگاهی را بررسی کردند. آن‌ها خطای بین مدل و داده‌های آزمایشگاهی را برای سه منطقه شامل ناحیه خوراک‌دهی، قسمت میانی استوانه و قسمت تخلیه به تفکیک ارایه کردند. در این مقاله با توجه به خطای چشمگیر مدل K-C در ناحیه تخلیه مواد که ناشی از فرض مقدار مرزی نادرست در مقطع تخلیه می‌باشد، اصلاحاتی در ساختار مدل K-C انجام شده است و با افزودن چهار پارامتر جدید به مدل اولیه خطای مدل تا حد زیادی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی کاهش داده شده است. در مورد حرکت مواد گرانوله در استوانه‌های دوار نیز در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی توسط ایندیرسان گاوندر<sup>(۴)</sup> [۱۶-۱۴] انجام شده است.

افزون بر حرکت محوری مواد، حرکت عرضی در استوانه‌های دوار نیز اهمیت به سزایی دارد. حرکت مواد در جهت عرضی تأثیر مهمی در یکنواخت شدن مواد دارد. با افزایش سرعت دوران ۶ الگوی جریان گوناگون در استوانه‌های دوار ایجاد می‌شود [۱۷]. تشکیل این الگوهای جریانی وابسته به ویژگی‌های فیزیکی پودر، قطر استوانه و پارامترهای عملیاتی مانند شیب، سرعت دوران و شدت جریان جرمی ورودی می‌باشد. الگوهای جریانی Slumping, Rolling, Cascading در صنعت و به ویژه در کوره‌های دوار سیمان، خشک‌کن‌های دوار، خنک‌کننده‌ها و غیره کاربرد بیشتری دارند. الگوی Slumping در سرعت‌های دورانی پایین (کم‌تر از ۳ درصد سرعت بحرانی) و الگوهای Rolling و Cascading

(۱) Specht et al.

(۲) Lebas et al.

(۳) Mujumdar

(۴) Yousefi and Shirvani

(۵) Programmable Logic Controller

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها.

نوع پودر	متوسط قطر ذره‌ها (میلی‌متر)	دانسیته (کیلوگرم بر ثانیه)	زاویه ریزش دینامیکی (درجه)
سیلیس	۰٫۲۴۴	۲۵۸۰	۳۰٫۵۰

در این جدول زاویه ریزش دینامیکی عبارت است از زاویه‌ای که سطح بالایی مواد (سطحی که با هوا در تماس است) با سطح افق تشکیل می‌دهد. در اینجا به کار بردن واژه دینامیک به واسطه در حال حرکت بودن استوانه است. این زاویه در حالت استاتیک با اندازه‌گیری زاویه بین سطح افق با یال مخروطی تشکیل شده با ریختن آرام مواد بر روی یک سطح افقی اندازه‌گیری می‌شود. در دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده اندازه‌گیری زاویه ریزش دینامیکی به کمک حسگرهای نوری که به صورت حلقه وار در اطراف استوانه در طول‌های گوناگون نصب شده بود انجام گرفته است (به شکل ۲ توجه شود).

### روش آزمایش

با توجه به بدنه شفاف استوانه دوار دستگاه آزمایشگاهی، میزان تجمع مواد و تغییرهای آن در هر مقطعی از استوانه به وسیله تصویربرداری از مقطع طولی و عرضی (برای انتهای تخلیه) و با استفاده از فناوری پردازش تصویری امکان‌پذیر است. در شکل ۳ شمایی از استوانه دوار و همچنین محل قرار گرفتن دوربین‌های تصویربرداری در طول و انتهای تخلیه استوانه نشان داده شده است.

دوربین‌ها طوری تنظیم شده‌اند که زاویه محور آن‌ها عمود بر سطح بستر مواد باشد. چهار دوربین با توانایی تصویربرداری ۲۵ فریم در ثانیه و به‌طور هم‌زمان برای فیلم‌برداری از آزمایش‌ها استفاده شده است. سه دوربین در طول استوانه و یک دوربین در انتهای تخلیه. فریم‌های تهیه شده از موقعیت‌های مکانی طولی و انتهای تخلیه استوانه به کمک پردازش تصویری داده‌های مربوط به ارتفاع بستر مواد را فراهم می‌کند.

در هر مقطعی از استوانه برای بررسی چگونگی تغییر ارتفاع بستر مواد با گذشت زمان تا رسیدن به حالت پایا نیاز به تشخیص ناحیه دارای پودر و ناحیه بدون پودر می‌باشد. برای شناسایی و دسته‌بندی این دو ناحیه از روش ماشین بردار پشتیبان<sup>(۱)</sup> (SVM) استفاده شده است.

این شرایط در حالتی که شدت جریان جرمی ورودی با شدت جریان جرمی خروجی برابر شود ایجاد می‌شود. با اندازه‌گیری میزان تجمع و طول وتر مربوط به قطاع حاوی مواد (وتر AB در شکل ۱-ب) در مقاطع عرضی گوناگون از استوانه دوار، داده‌های آزمایشگاهی حالت پایای ارتفاع بستر محاسبه و با مقدارهای ارتفاع بستر محاسبه شده از مدل K-C مقایسه می‌شود. آزمایش‌ها چنان طراحی شده‌اند که اثر پارامترهای عملیاتی و هندسی بر تغییر ارتفاع بستر مواد در حالت پایا و بدون حضور مانع در مسیر حرکت مواد بررسی شوند. پارامترهای بررسی شده عبارت‌اند از: شیب، سرعت دوران و شدت جریان جرمی ورودی به استوانه. بازه‌ی عملیاتی برای تغییر سرعت دوران، شیب و شدت جریان جرمی ورودی به استوانه دوار به ترتیب بین ۲٫۵ تا ۷٫۰۰ دور در دقیقه و ۰٫۰۰ تا ۳٫۰۰ درجه و ۶٫۸۰ تا ۱۳٫۶۰ گرم در ثانیه در نظر گرفته شده است. در این آزمایش‌ها شرایط عملیاتی چنان انتخاب شده‌اند که انجام آزمایش‌ها با توجه به مقدارهای اعداد بدون بعد فرود و درجه پرشدگی در بازه‌ی الگوهای جریان Slumping, Rolling, Cascading قرار داشته باشند. روابط مربوط به محاسبه عدد فرود و درجه پرشدگی در معادله‌های (۶) و (۷) آورده شده است.

$$Fr = \frac{(\gamma \pi n)^2 R}{g} \quad (6)$$

$$j = \frac{1}{\pi} (\phi - \sin \phi \cos \phi) \quad (7)$$

در معادله‌های (۸) الی (۱۰)، بازه‌ی اعداد بدون بعد فرود و درجه پرشدگی برای ایجاد الگوهای Slumping, Rolling, Cascading آورده شده است [۱۷].

$$\text{Slumping regime: } 10^{-5} < Fr < 10^{-3}, J < 0.1 \quad (8)$$

$$\text{Rolling regime: } 10^{-2} < Fr < 10^{-4}, J > 0.1 \quad (9)$$

$$10^{-3} < Fr < 10^{-1}, J > 0.1 \text{ Cascading regime} \quad (10)$$

ویژگی‌های فیزیکی مربوط به پودر استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

(۱) Support Vector Machine

منجر به امکان استفاده از دنباله‌های با طول متغیر در کلاس‌بندی می‌شود. فرض کنیم داده‌های آموزشی و مقادیر دلخواه خروجی آن‌ها، تشکیل زوج‌های  $(x_i, y_i)$  را بدهند، به طوری که  $x_i \in \mathbb{R}^n$ ،  $y_i \in (-1, +1)$  و  $i = 1, 2, \dots, l$  می‌باشد. در فضای  $d$  بعدی یاد شده هر ابرصفحه را می‌توان به کمک یک بردار وزن  $w$  و یک مقدار ثابت انحراف (Bias)  $b$ ، به شکل معادله (۱۱) تعریف نمود [۱۸، ۱۹]. فناوری SVM در زمینه‌های بسیاری به کار گرفته شده است. به عنوان نمونه در اندازه‌گیری جزء حجمی (Void Fraction) گاز در جریان دو فاز نفت - گاز [۲۰] و در جریان دو فاز انتقال هوایی گندم به کار گرفته شده است [۲۱]. در موضوع‌های زیستی و بیوانفورماتیک نیز روش SVM به کار گرفته شده است [۲۲].

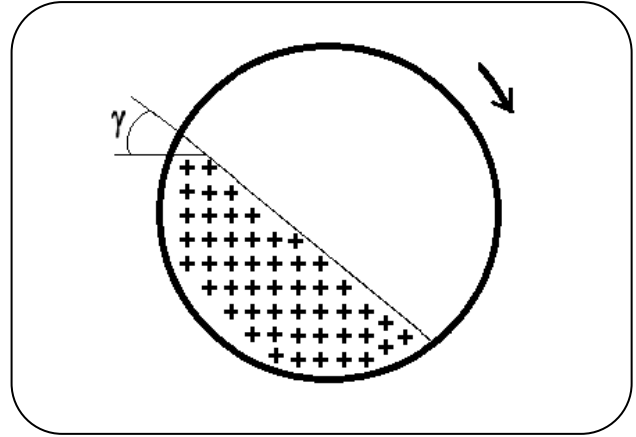
$$w \cdot x + b = 0 \quad (11)$$

در این میان یافتن ابرصفحه‌ای مدنظر می‌باشد که بتواند نمونه‌های کلاس +۱ را از نمونه‌های کلاس -۱ جدا نماید. به این ابرصفحه، ابرصفحه متمایزکننده گفته می‌شود. روشن است هر نقطه  $x$  که روی ابر صفحه قرار گیرد در معادله  $w \cdot x + b = 0$  صدق می‌کند.

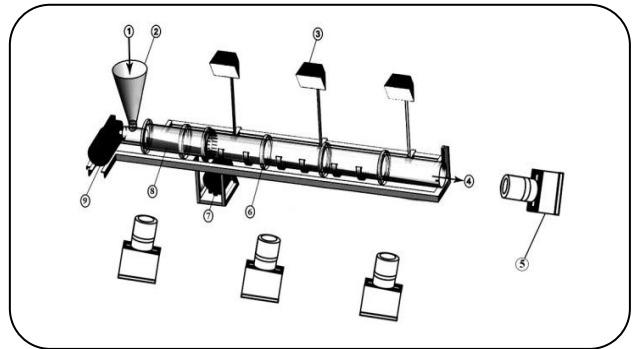
این دو کلاس را می‌توان به کمک تابع متمایزکننده  $f(x) = \text{sign}(w \cdot x + b)$  از یکدیگر جدا نمود. به عبارت دیگر فرض کنید داده‌های دو کلاس جدایی‌پذیر باشند و بردارهای ویژگی کلاس اول روی ابر صفحه  $H^+$  و بردارهای ویژگی کلاس دوم روی ابر صفحه  $H^-$  واقع شوند. ابر صفحه‌های  $H^+$  و  $H^-$  را می‌توان به صورت معادله (۱۲) تعریف نمود:

$$H^+ : w \cdot x + b = +1, \quad H^- : w \cdot x + b = -1 \quad (12)$$

باید توجه شود که ابر صفحه‌های  $H^+$  و  $H^-$  موازی می‌باشند. نمونه‌هایی که روی ابر صفحه‌های  $H^+$  و  $H^-$  قرار می‌گیرند، بردار پشتیبان<sup>(۱)</sup> نامیده می‌شوند. فاصله بین دو ابر صفحه  $H^+$  و  $H^-$  که برابر با  $2/\|w\|$  می‌باشد حاشیه<sup>(۲)</sup> یا ناحیه مرزی نامیده می‌شود. روشن است که داشتن ناحیه مرزی بزرگ‌تر دلخواه‌تر می‌باشد. بدین منظور بایستی  $2/\|w\|$  بیشینه شود و یا به عبارتی  $\|w\|$  کمینه شود. پس می‌توان گفت ماشین بردار پشتیبانی طراحی شده بایستی ابتدا نمونه‌ها را به درستی طبقه‌بندی نماید و سپس نمونه‌ها بر روی ناحیه مرزی و یا خارج از آن قرار گیرند. برای ارضای



شکل ۲- چگونگی اندازه‌گیری زاویه ریزش دینامیکی.



شکل ۳- بخش‌های گوناگون استوانه دوار و محل قرار گرفتن دوربین‌های فیلم‌برداری. (۱) ورودی مواد، (۲) مخزن ذخیره‌سازی مواد، (۳) پروژکتور، (۴) خروجی مواد، (۵) دوربین، (۶) فلنج، (۷) موتور دوران دهنده، (۸) ارتفاع بستر مواد، (۹) موتور خوراک دهنده.

### ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان (SVM) یک کلاس‌بندی کننده از نوع تمایزی می‌باشد که از مفهوم‌های ساده‌ای ناشی شده است اما با گسترش همین مفهوم‌های ساده تبدیل به یکی از قدرتمندترین کلاس‌بندی کننده‌های تمایزی شده است [۱۸]. ایده اصلی کلاس‌بندی کننده‌های تمایزی به دست آوردن پارامترهای خط مستقیم می‌باشد که مجموعه نقاط فضا را به دو کلاس متفاوت تقسیم می‌نمایند. در اساس SVM نوعی کلاس‌بندی کننده خطی می‌باشد؛ اما با استفاده از تابع‌های هسته، SVM قادر به تصمیم‌گیری غیرخطی نیز می‌باشد. انتخاب هسته‌های مناسب برای SVM منجر به برتری آن نسبت به بسیاری دیگر از کلاس‌بندی کننده‌های خطی مبتنی بر تصمیم‌گیری خطی شده است. همچنین استفاده از تابع‌های هسته

(۱) Support Vector

(۲) Margin

فیلم برداری مشخص می‌کنیم. این بازه با خطوط  $x_1$  و  $x_2$  در شکل ۴ مشخص شده است. مختصات طولی  $x_1$  و  $x_2$  با توجه به مختصات واقعی مکانی از استوانه که در آن فیلم برداری انجام شده است مشخص می‌باشد. حال یک موقعیت مکانی خاص بین مختصات  $x_1$  و  $x_2$  را انتخاب می‌کنیم. این مختصات به صورت یک خط موازی با  $x_1$  و  $x_2$  بر روی استوانه انتخاب می‌شود. با توجه به نسبت‌های طولی بین موقعیت مکانی خط ترسیم شده (خط  $x_3$ ) با موقعیت مکانی خطوط  $x_1$  و  $x_2$  مختصات مکانی واقعی نقطه مورد نظر به دست می‌آید. پیکسل‌های مربوط به تصویر مقطع عرضی و طولی استوانه در هر فریم از تصویرها توسط طبقه‌بندی کننده‌ی SVM به دو کلاس تقسیم بندی می‌شود. کلاس اول شامل ناحیه‌های دارای پودر و کلاس دوم شامل ناحیه‌های بدون پودر است. این ناحیه‌ها با سطوح  $A_1$  و  $A_2$  در شکل ۴ مشخص شده است. برای محاسبه‌های دقیق‌تر عمق بستر مواد زاویه تصویر برداری، تنظیمات دوربین‌ها و تمام عامل‌های مؤثر بر تصویر برداری از جمله نور محیط باید ثابت باشد. پس از شناسایی این ناحیه‌ها، برای محاسبه چگونگی تغییر ارتفاع بستر مواد در مقطع طولی و عرضی نسبت بین طول وتر  $AB$  و قطر استوانه در فریم‌های ویدئویی محاسبه می‌شود. از مقدار قطر به عنوان یک شاخص در محاسبه‌ها عمق بستر مواد استفاده می‌شود.

نوسانات زیادی که در موقعیت زاویه‌ای سطح بستر مواد ضمن دوران استوانه اتفاق می‌افتد، تأثیر زیادی بر دقت اندازه‌گیری عمق بستر مواد دارد. به منظور تشخیص دقیق منطقه دارای پودر از حدود هر ۱۰ فریم ویدئویی یک نمونه به عنوان میانگین گرفته شده است تا این نوسانات به کم‌ترین میزان کاهش یابد. با توجه به شکل ۵ و با استفاده از معادله (۱۸) مقدار ارتفاع بستر مواد به کمک مقدارهای طول وتر  $AB$  به دست آمده قابل محاسبه است.

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{AB}{2}\right)^2} \quad (18)$$

این اندازه‌گیری‌ها در مقاطع گوناگون در طول استوانه به ویژه در ناحیه تخلیه منجر به تهیه داده‌های صحیح و قابل اطمینانی برای به دست آوردن پارامترهای یک مدل اصلاح شده برای جریان پایایی مواد در استوانه می‌شود.

این شرایط کافی است به ازای تمام نمونه‌ها  $y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1$  باشد. تمامی این شرایط را می‌توان در قالب معادله (۱۳) خلاصه نمود [۲۲، ۲۳].

$$\begin{cases} \text{Minimize } \|w\|^2 \\ \text{Subject to } y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \text{ for } i = 1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (13)$$

این مسئله یک مسئله بهینه‌سازی محدب<sup>(۱)</sup> از درجه دوم<sup>(۲)</sup> می‌باشد. برای حل مسئله فوق تابع لاگرانژ<sup>(۳)</sup> را همانند معادله (۱۴) تشکیل داده و آن را حل می‌کنیم.

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^L \alpha_i y_i (w \cdot x_i + b) + \sum_{i=1}^L \alpha_i \quad (14)$$

در نقطه جواب با مساوی صفر قرار دادن مشتق  $L$  نسبت به  $w$  و  $b$  و روابط معادله (۱۵) به دست می‌شود.

$$w = \sum_{i=1}^L \alpha_i y_i x_i, \quad \sum_{i=1}^L \alpha_i y_i = 0 \quad (15)$$

با جایگذاری این مقادارها در مسئله دوگان واف به دست می‌آید.

$$\begin{cases} \text{Maximize } w(\alpha) = \sum_{i=1}^L \alpha_i - \sum_{i=j=1}^L \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \\ \text{Subject to } \alpha_i \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, L \text{ and } \sum_{i=1}^L \alpha_i y_i = 0 \end{cases} \quad (16)$$

حل مسئله برای معادله (۱۶) دوگان ضریب‌های لاگرانژ را به ما می‌دهد، به طوری که هر کدام از  $\alpha_i$ ها متناظر با یکی از نمونه‌های  $x_i$  می‌باشد. الگوهای  $x_i$  که متناظر با  $\alpha_i \geq 0$  می‌باشند بردار پشتیبان یا  $sv_i$  نامیده می‌شوند. در این صورت می‌توان تابع ابر صفحه متمایز کننده را به صورت معادله (۱۷) نوشت.

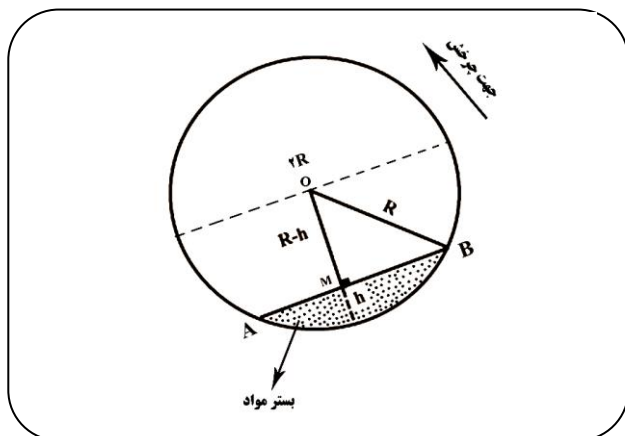
$$f(x) = \text{Sgn}\left(\sum_{i=1}^{N_{sv}} y_i \alpha_i (x \cdot x_i) + b\right) = \text{Sgn}\left(\sum_{i=1}^{N_{sv}} y_i \alpha_i (x \cdot sv_i) + b\right) \quad (17)$$

در مورد موضوع این مقاله برای شروع بازه‌ی طولی از استوانه را که می‌خواهیم محاسبه‌ها در آن انجام گیرد بر روی فریم‌های

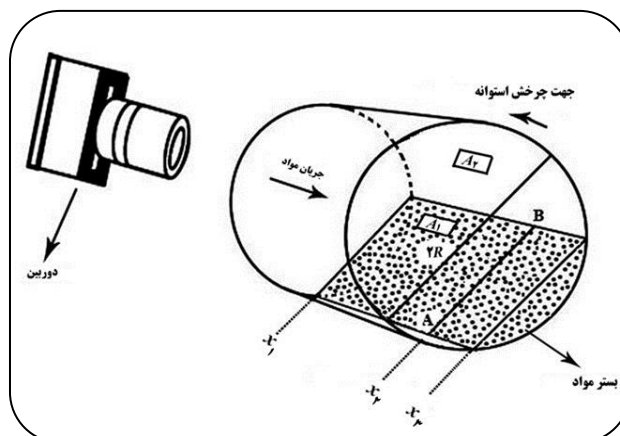
(۱) Convex Optimization

(۲) Quadratic

(۳) Lagrange Function



شکل ۵ - تصویر مقطع عرضی استوانه دوار.



شکل ۴ - تصویر مقطع طولی استوانه دوار.

در نظر گرفته شده برای مدل K-C می‌باشد. میانگین مجذور خطاها در معادله (۱۹) ارایه شده است.

$$MSE = \frac{\sum (y_{est} - y_{exp})^2}{N} \quad (19)$$

در این رابطه  $y_{est}$  مقدارهای تخمین زده شده توسط مدل و  $y_{exp}$  مقدارهای آزمایشگاهی می‌باشد.

در عمل ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه چندین برابر بزرگ‌تر از مقدار در نظر گرفته شده به عنوان شرط مرزی (قطر یک‌ذره) در مدل K-C می‌باشد. شکل ۷ نسبت ارتفاع پایای بستر مواد در انتهای تخلیه به قطر متوسط ذره‌ها استفاده شده در آزمایش‌ها نسبت به پارامتر بدون بعد  $C_A$  در شیب‌های گوناگون را نشان می‌دهد (تابعیت پارامتر  $C_A$  در معادله (۳) آورده شده است). شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر  $C_A$  در شیب ثابت، نسبت ارتفاع بستر مواد در مقطع خروجی به متوسط قطر ذره‌ها به آرامی افزایش می‌یابد. این نکته با توجه به ماهیت فرایند که با افزایش درجه پرشدگی ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه افزایش می‌یابد قابل توجیه است؛ اما افزایش شیب استوانه اثر وارون بر ارتفاع بستر مواد دارد. در بخش بعدی این مقاله از این پارامتر برای بهبود کارایی مدل K-C استفاده خواهد شد.

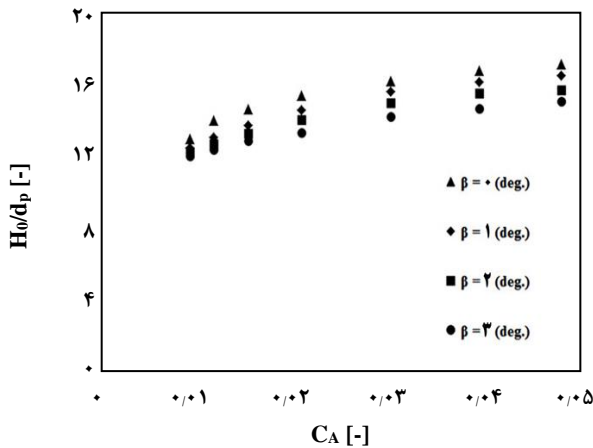
### مدل اصلاح شده

به منظور توسعه مدل اصلاح شده بر مبنای داده‌ها ابتدا شرایط مرزی مدل K-C با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارتفاع بستر

### خطای مدل K-C

در حالت پایا تغییر ارتفاع بستر مواد در مقاطع گوناگون باگذشت زمان بسیار ناچیز می‌باشد. این داده‌ها شامل دو بخش می‌باشد. دسته اول داده‌های مربوط به تغییر ارتفاع بستر مواد در موقعیت‌های مکانی گوناگون در طول استوانه و دسته دوم داده‌های مربوط به تغییر ارتفاع بستر مواد در ناحیه تخلیه می‌باشد. نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتیجه‌های مدل K-C در برخی از بازه‌های پارامترهای عملیاتی به ویژه برای مقدارهای ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه استوانه دیده نمی‌شود. در شکل ۶ نمودار سه بعدی تغییرهای میانگین مجذور خطاها<sup>(۱)</sup> (MSE) بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل K-C برحسب تغییر شیب و سرعت دوران استوانه در بازه‌ی عملیاتی آزمایش‌های انجام شده ترسیم شده است. این نمودار برای زیر نواحی گوناگون عملیاتی در بازه‌ی شیب بین صفر تا ۳/۰۰ درجه و سرعت دوران بین ۲/۵۰ تا ۷/۰۰ دور در دقیقه ترسیم شده است. میانگین مجذور خطاها برای هفت موقعیت مکانی ۰/۴۰، ۰/۶۰، ۰/۹۰، ۱/۲۰، ۱/۵۰، ۱/۸۰ و ۱/۹۵ متری نسبت به مقطع سمت خوراک دهنده آورده شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که بازه‌ی عملیاتی پر خطای مدل K-C، شامل سرعت‌های دورانی پایین (کم‌تر از ۴/۰۰ دور در دقیقه) و شیب‌های زیاد (بیش‌تر از ۱ درجه) می‌باشند. از طرف دیگر خطا بین مقدارهای پایای ارتفاع بستر مواد به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و مدل K-C در انتهای تخلیه بسیار زیاد می‌باشد. این خطای زیاد در عمل، ناشی از شرط مرزی غیر واقعی

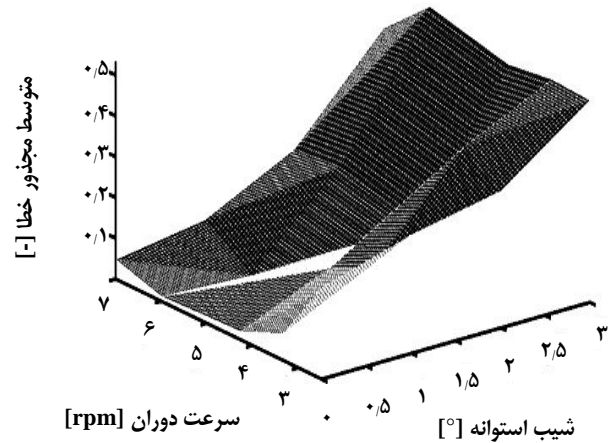
(۱) Mean Square Error



شکل ۷ - نسبت ارتفاع بستر در مقطع خروجی به متوسط قطر ذره‌ها بر حسب پارامتر  $CA$  در شیب‌های گوناگون.

تشکیل زوج‌های  $(x_i, y_i)$  را می‌دهند، به طوری که  $x_i \in \mathbb{R}^n$  و  $y_i \in \mathbb{R}$  می‌باشد. هدف در SVR یافتن ابرصفحه‌ای است که بهترین برازش را بر روی داده‌ها داشته باشد. در این روش مقدار  $\varepsilon$  برابر بیش‌ترین خطای ممکن می‌باشد که مدل می‌تواند تحمل کند. برای داده‌هایی که از مرز  $\varepsilon$  عبور می‌کنند ضریب جریمه‌ای تعریف می‌شود تا این داده‌ها تأثیر کم‌تری در یادگیری مدل داشته باشند. ضریب جریمه با پارامتر  $C$  بیان می‌شود. ضریب  $C$  یک توازن بین مدل و خطای نمونه‌ها ایجاد می‌کند. در الگوریتم SVR مقدار  $\varepsilon$  به صورت اختیاری و به طور معمول بین صفر و یک انتخاب می‌شود. در شکل ۸ چگونگی عملکرد روش SVR آورده شده است.

در الگوریتم‌های SVR و SVM تابع هسته روش حل را مشخص می‌کند. برای تابع هسته انتخاب‌های گوناگونی مانند (Linear, Polynomial, Sigmoid, Radial, Basic Function, ...) وجود دارد. در اینجا از تابع هسته (Multi-Quadratic) استفاده شده است که تابع چندهسته‌ای<sup>(۱)</sup> می‌باشد. در سال‌های اخیر چندین روش برای ترکیب توابع هسته مجزا و ایجاد توابع چندهسته‌ای ارزیابی شده است. تابع چندهسته‌ای برای داده‌های غیرخطی یا داده‌های به شدت وابسته به هم (High Interactions) کاربرد دارد. این ویژگی‌ها در روند تغییرات داده‌های آزمایشگاهی با تغییر پارامترهای عملیاتی مانند شیب، سرعت دوران و شدت جریان جرمی دیده می‌شود.



شکل ۶ - بازه عملیاتی بر خطا بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل  $K-C$ ،  $\rho_{\text{powder}} = 258 \text{ kg/m}^3$ ،  $\gamma_{\text{power}} = 30 \pm 0.5 \text{ deg}$ ،  $Q_s = 10.33 \text{ g/s}$

در انتهای تخلیه تصحیح می‌شود. در واقع، شرط مرزی ارتفاع بستر در مقطع خروجی استوانه یک شرط مرزی ثابت نیست و مطابق شکل ۷ بستگی به شرایط عملیاتی دارد. در نتیجه، از روش برازش بردار پشتیبان<sup>(۱)</sup> استفاده شده است. سپس از مدل اصلاح‌شده‌ای بر مبنای مدل  $K-C$  که شامل ۴ پارامتر اضافی نسبت به این مدل می‌باشد استفاده شده است. این مدل در معادله (۲۰) نشان داده شده است.

$$\frac{dh}{dx} = e C_A^k \left( 1 - \left( 1 - \frac{h}{R} \right)^2 \right)^{-3/2} - f C_B^r \quad (20)$$

تابعیت پارامترهای بی بعد  $C$  و  $C_B$  در معادله (۳) ارزیابی شده است. پارامترهای  $e$ ،  $f$ ،  $k$ ،  $r$  با تطابق دادن داده‌های آزمایشگاهی با مدل ارزیابی شده در معادله (۲۰) محاسبه می‌شوند. برای تطابق داده‌ها و مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

### برازش بردار پشتیبان

این روش همانند الگوریتم ماشین بردار پشتیبان SVM می‌باشد با این تفاوت که در اینجا داده‌های خروجی می‌توانند بیش از دو مقدار داشته باشند. در SVM داده‌ها فقط یک خروجی یا کلاس (+۱ یا -۱) داشتند. مقدارهای ورودی در هر دو روش یکسان می‌باشند، یعنی داده‌ها می‌توانند در فضای  $n$  بعدی تعریف شوند. داده‌های آموزشی و مقدارهای دلخواه خروجی آن‌ها

(۱) Support Vector Regression

(۲) Multiple kernels



جدول ۲- پارامترهای مدل SVR.

پارامترهای مدل	C	$\lambda$	$\epsilon$
مقدار	۴	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱

جدول ۳- پارامترهای مدل اصلاح شده K-C.

پارامتر	e	f	k	r
مقدار	۰/۰۶۲	۰/۱۲۱	۰/۸۰۱	۰/۴۳۴

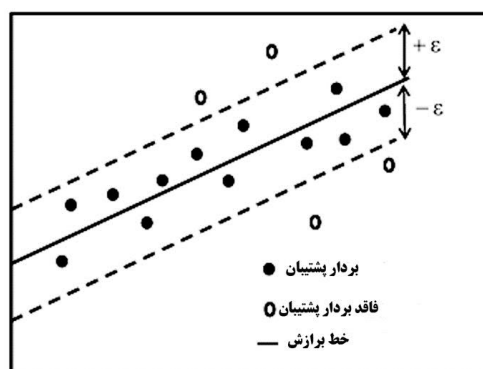
و مدل اصلاح شده K-C در طول استوانه با داده‌های آزمایشگاهی آورده شده است. برای ارتفاع بستر در انتهای تخلیه از ۲۴ داده آزمایشگاهی و برای ارتفاع بستر در طول استوانه از ۱۶۸ داده آزمایشگاهی استفاده شده است. در هر دو مدل سازی ۷۵٪ داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش و ۲۵٪ داده‌ها به عنوان داده آزمون استفاده شده است.

میانگین مجذور خطاها و ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتیجه‌های مدل‌های ارایه شده در جدول‌های ۴ و ۵ گزارش شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود خطای مدل اصلاح شده K-C در مقایسه با مدل اولیه به مقدار چشمگیری کاهش پیدا کرده است. خطای ضریب همبستگی که با  $R^2$  نشان داده می‌شود در معادله (۲۱) ارایه شده است.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_N (y_{est} - y_{est,ave})(y_{exp} - y_{exp,ave})}{\sqrt{\sum_N (y_{est} - y_{est,ave})^2} \times \sqrt{\sum_N (y_{exp} - y_{exp,ave})^2}} \right]^2 \quad (21)$$

در معادله (۲۱) " $y_{est}$ " مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل، " $y_{est,ave}$ " متوسط مقادیرهای پیش‌بینی شده توسط مدل، " $y_{exp}$ " مقدار داده آزمایشگاهی و " $y_{exp,ave}$ " متوسط مقادیرهای داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ برای بیان متوسط مجذور خطا بین مدل K-C و مدل اصلاح شده نسبت به داده‌های آزمایشگاهی ارایه شده‌اند. این شکل‌ها برای بررسی اثر تغییرها در شیب، سرعت دوران و شدت جریان جرمی ورودی به استوانه تهیه شده‌اند. دیده می‌شود که پارامترهای جدید افزوده شده ( $e, k, f, r$ ) باعث ایجاد تطابق بهتری بین مدل اصلاح شده و داده‌های تجربی در تمام بازه‌ی پارامترهای عملیاتی شده است. این در حالی است که



شکل ۸ - چگونگی عملکرد روش SVR.

دست‌یابی به برازش مناسب نیازمند تنظیم مناسب پارامترهای  $\lambda, C, \epsilon$  می‌باشد که با حدس و خطا مقدار مطلوب محاسبه می‌شود [۲۲].

در جدول ۲ پارامترهای مدل SVR برای تصحیح شرایط مرزی مدل K-C آورده شده است.

بعد از تصحیح شرایط مرزی مدل K-C، به کمک داده‌های آزمایشگاهی ارتفاع پایای بستر مواد در طول استوانه ضریب‌های مدل اصلاح شده در معادله (۲۰) با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>(۱)</sup> محاسبه شده‌اند [۲۲-۲۵]. رابطه‌های مورد استفاده برای یافتن پارامترهای بهینه در مدل برازش بردار پشتیبان برای تصحیح شرایط مرزی مدل K-C و همچنین در الگوریتم ژنتیک میانگین مجذور خطاها می‌باشد که در معادله (۱۹) آورده شده است. در جدول ۳ پارامترهای مدل اصلاح شده K-C که با روش الگوریتم ژنتیک به دست آمده‌اند آورده شده است [۲۴-۲۷].

در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه بین مقادیرهای پیش‌بینی شده ارتفاع پایای بستر مواد در انتهای تخلیه استوانه توسط مدل SVR

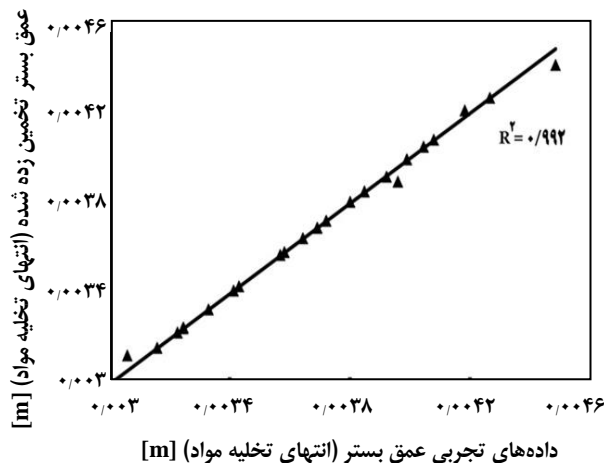
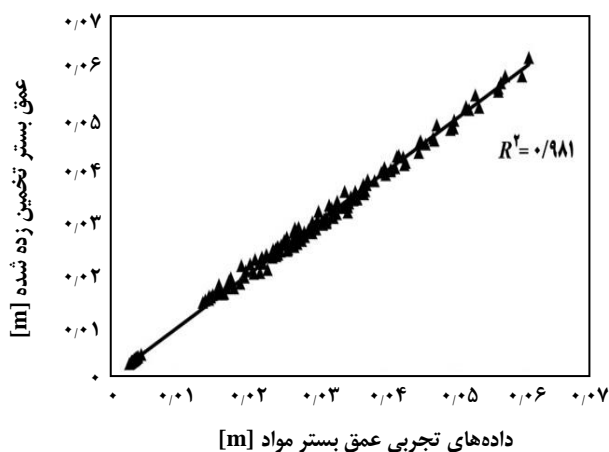
(۱) Genetic algorithm

جدول ۴- داده‌های آماری مدل SVR.

مقدار	معیار
ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه	
۰/۰۱۴	MSE
۰/۹۹۲	$R^2$

جدول ۵- داده‌های آماری مدل K-C اصلاح شده.

مقدار	معیار
ارتفاع بستر مواد در طول استوانه	
۰/۱۲۲	MSE
۰/۹۸۱	$R^2$



شکل ۱۰- مقایسه مقدارهای پیش‌بینی شده ارتفاع بستر مواد در طول استوانه به دست آمده از مدل اصلاح شده K-C و داده‌های آزمایشی.

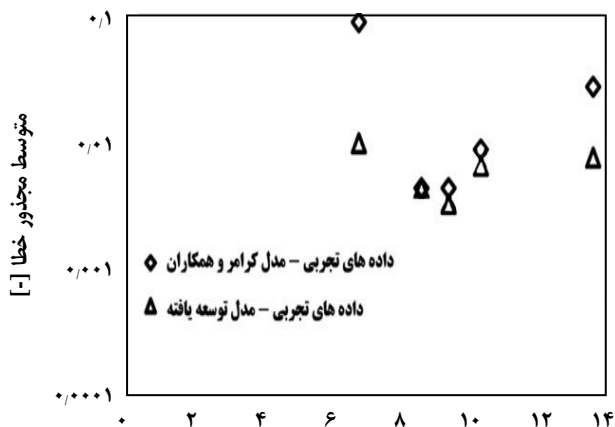
شکل ۹- مقایسه مقدارهای پیش‌بینی شده ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه به دست آمده از مدل SVR و داده‌های آزمایشی.

بیش تر نسبت به مدل اولیه می‌باشد ارایه شده است. دو گروه داده آزمایشگاهی شامل داده‌های پایای ارتفاع بستر مواد در انتهای تخلیه و در طول استوانه دوار برای تصحیح شرایط مرزی مدل اولیه و همچنین محاسبه پارامترهای مدل اصلاح شده استفاده شده است. بررسی و مقایسه میانگین مجذور خطا بین داده‌های آزمایشگاهی، مدل اولیه و مدل اصلاح شده نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین نتیجه‌های مدل اصلاح شده و داده‌های آزمایشگاهی در کل بازه‌ی پارامترهای عملیاتی به ویژه انتهای تخلیه وجود دارد. در حالی که تطابق در مورد مدل اولیه برای شیب‌های بالا و سرعت دوران‌های پایین بسیار ضعیف است.

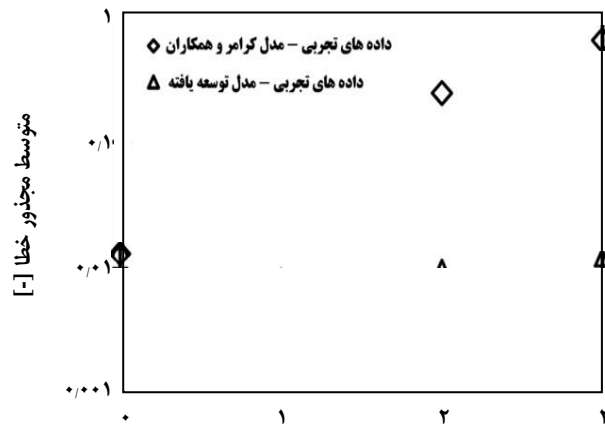
خطای بین مدل K-C با داده‌های آزمایشگاهی در شیب‌های بالا و سرعت دورانی پایین بسیار زیاد است.

### نتیجه‌گیری

مدل متداول برای محاسبه ارتفاع پایای بستر مواد در استوانه‌های دوار به دلیل استفاده از شرایط مرزی نامناسب تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی در ناحیه تخلیه و برخی بازه‌های پارامترهای عملیاتی ندارد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمده از یک دستگاه آزمایشگاهی و به کمک فناوری پردازش تصویر مدل اصلاح شده‌ای که شامل ۴ پارامتر



تغییر در شدت جریان جرمی ورودی به استوانه دوار [g/s]



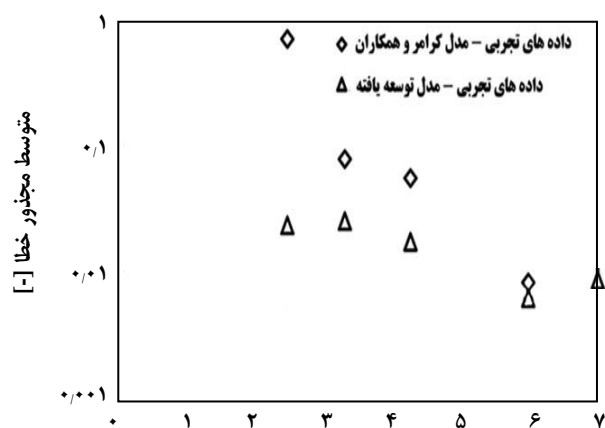
تغییر شیب استوانه دوار [°]

شکل ۱۰- میانگین مجذور خطا برای مدل K-C و مدل اصلاح شده نسبت به داده های آزمایشگاهی برای تغییرها در شدت جریان جرمی ورودی.  $n = 6,000$  (rpm),  $\gamma_{power} = 30 \pm 0.50$  (deg.),  $\rho_{powder} = 2580$  (kg/m<sup>3</sup>),  $\beta = 1,000$  (g/s)

شکل ۱۱- میانگین مجذور خطا برای مدل K-C و مدل اصلاح شده نسبت به داده های آزمایشگاهی برای تغییرها در شیب استوانه.  $n = 6,000$  (rpm),  $\gamma_{power} = 30 \pm 0.50$  (deg.),  $\rho_{powder} = 2580$  (kg/m<sup>3</sup>),  $Q_s = 10,333$  (g/s)

### نمادها

e,f,K,r	ضریب تعریف شده در معادله (۲۰)
C <sub>A</sub>	ضریب تعریف شده در معادله (۲)
C <sub>B</sub>	ضریب تعریف شده در معادله (۲)
d <sub>p</sub>	اندازه متوسط ذره، m
g	شتاب جاذبه، m/s <sup>2</sup>
h	عمق بستر، m
L	طول مخزن، m
n	سرعت دوران، rev/s
Q <sub>v</sub>	شدت جریان حجمی مواد جامد رد شده، m <sup>3</sup> /s
Q <sub>s</sub>	شدت جریان جرمی مواد جامد رد شده، g/s
R	شعاع مخزن، m
x	جهت محوری از محل تغذیه، m



تغییر سرعت دوران استوانه دوار [rpm]

شکل ۱۲- میانگین مجذور خطا برای مدل K-C و مدل اصلاح شده نسبت به داده های آزمایشگاهی برای تغییرها در سرعت دوران.  $\beta = 1,000$  (rpm),  $\gamma_{power} = 30 \pm 0.50$  (deg.),  $\rho_{powder} = 2580$  (kg/m<sup>3</sup>),  $Q_s = 10,333$  (g/s)

### حرف‌های یونانی

$\beta$	تمایل محور استوانه، deg.
$\gamma$	زاویه استراحت از مواد، deg.
$\varphi$	نصف زاویه دید بستر مواد از محور استوانه، deg.

محاسبه‌ها نشان می‌دهد که میانگین مجذور مربعات خطای مدل اولیه در مقایسه با مدل اصلاح شده نسبت به داده های جمع‌آوری شده از سرتاسر طول استوانه از مقدار ۰.۱۲۲ به مقدار ۰.۰۱۴ کاهش یافته است؛ که البته بیش‌تر این کاهش مربوط به ناحیه تخلیه می‌باشد.

## اندریس‌ها

حجمی

جرمی

V

S

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۱

## مراجع

- [1] Mostorakos E., Massias A., Tsakiroglou C.D., Goussis D.A., Burganous V.N., [CFD Predictions for Cement Kiln Including Flame Modeling, Heat Transfer and Chemistry](#), *Applied Mathematical Modeling*, **23**, 55 (1999).
- [2] Saeman W.C., [Passage of Solids Through Rotary Kilns](#), *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 508-514 (1951).
- [3] Kramers H., Croockewit P., [The Passage of Granular Solids through Inclined Rotary Kilns](#), *Chem. Eng. Sci.*, **1**, 259- 265 (1952).
- [4] Perron J., Bui R.T., [Rotary Cylinders: Solid Transport Prediction by Dimensional and Rheological Analysis](#), *Can. J. Chem. Eng.*, **68**: 61-68 (1990).
- [5] Spurling R.J., Davidson J.F., Scott D.M., [The Transient Response of Granular Flows in An Inclined Rotating Cylinder](#), *Trans. IChemE*, **79**: 51-61 (2001).
- [6] Ranco J.J., [Tecnologia deLas Operaciones y Los Procesos de la Industria Quimica](#), *Industria y Quimica*, **20**: 605-614 (1965).
- [7] Vahl L., Kingma W.G., [Transport of Solids Through Horizontal Rotary Cylinders](#), *Chem. Eng. Sci.*, **1**: 253-258 (1952).
- [8] Afacan J.H., Masliyah A., [Solid Hold-up in Rotary Drums](#), *Powder Technology*, **61**: 179-184 (1990).
- [9] Spurling R.J., "Granular Flow in an Inclined Rotating Cylinder: Steady state and Transient", Ph. D. Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Cambridge (2000).
- [10] Specht E., Yi-Chun. Shi, Woche H., Knabbe J., Sprinz U., [Experimental Investigation of Solid Bed Depth at the Discharge End of Rotary kilns](#), *Powder Technology*, **197**: 17-24 (2010).
- [11] Lebas E., Hanrot F., Ablitzer D., Houzelot J.L., [Experimental Study of Residence Time, Particle Movement and Bed Depth Profile in Rotary Kilns](#), *Can. J. Chem. Eng.*, **73**: 173-180 (1995).
- [12] Mujumdar K.S., "Modeling of Rotary Cement Kiln: Reaction Engineering and CFD", 1st Edition, VDM Verlag Dr. Müller Publication, Germany (2009).
- [13] Yousefi M.R., Shirvani M., [Material Flow in Rotary Drums](#), *Int. J. Eng.*, **27**: 509-519 (2014).
- [14] Govender I., [Granular Flows in Rotary Drums; A Rheological Perspective Review Article](#), *Minerals Engineering*. **92**: 168-175 (2016).
- [15] Santomaso A.C., Ding Y.L., Lickiss J.R., York D.W., [Investigation of Granular Behaviour in Rotating Drum Operated over a Wide Range of Rotational Speed](#), *Chem. Eng. Res. and Des.*, **81**: 936-945 (2003).

- [16] Zheng Q.J., Yu A.B., [Modeling the Granular Flow in Rotating Drum by the Eulerian Finite Element](#), *Powder Technology*, **286**: 361-370 (2015)
- [17] Henein H., Brimacombe J., Watkinson A.P., [Experimental Studies of Transverse Bed Motion in Rotary Kilns](#), *Met. Trans.*, **14B**, 207-220 (1983).
- [18] Burges C.J.C., [A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition](#), *Data Mining and Knowledge Discovery*, **2**(2): 121-167 (1998).
- [19] Cortes C. and Vapnik. V, [Support Vector Networks](#), *Machine Learning*, **20**: 273-297 (1995).
- [20] Peng Z., Yin H., [ECT and LS-SVM Based Void Fraction Measurement of Oil-Gas Two-Phase Flow](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **29** (1): 41-50 (2010).
- [21] Sarrami Foroushani, A. and M. Nasr Esfahany, [CFD Simulation of Gas-Solid Two-Phase Flow in Pneumatic Conveying of Wheat](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **34**(4): 123-140 (2015).
- [22] Torabi Dashti H., Masoudi-Nejd A., [A Mining Biological Repetitive Sequences Using Support Vector Machines and Fuzzy SVM](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **29**(4): 1-17 (2010)
- [23] Basak D., Pal S., Patranabis D.C., ["Support Vector Regression, Neural Information Processing – Letters and Reviews"](#), **11**: No. 10 (2007).
- [24] Lawrence D., ["Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold"](#), 1st edition (1991).
- [25] Mitchell M, ["An Introduction to Genetic Algorithms, The MIT Press"](#) (1998).
- [26] Winter G., Periaux J., Galan M., Gesta P., ["Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science"](#), John Wiley & Sons (1996).
- [27] Michalewicz Z., ["Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs"](#), Springer-Verlag (1996).