

ساخت شبیه ساز دینامیکی مدار خردایش در محیط SIMULINK

یاسر کیانی نیا^۱، محمد رضا خالصی^{۲*}، احمد خدادادی دربان^۳، عبدالرحیم فروتن^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، yaser.kianinia@gmail.com

۲- استادیار دانشگاه تربیت مدرس، mrkhalesi@modares.ac.ir

۳- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، akdarban@modares.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، abr.foroutan@gmail.com

(دریافت ۲۵ آبان ۱۳۹۰، پذیرش ۶ خرداد ۱۳۹۱)

چکیده

کنترل و بهینه سازی روی خط یک سیستم در صورتی امکان پذیر است که مدل دینامیکی سیستم در اختیار باشد. با استفاده از شبیه سازی دینامیکی می توان رفتار غیر خطی و تعامل دینامیکی مدارهای خردایش را بررسی کرد. در این مقاله مدل دینامیکی آسیا بر اساس مدل کلی موازنه جمعیتی و مدل هیدروسیکلون بر اساس مدل پلیت در محیط MATLAB/SIMULINK پیاده سازی و مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس مدار خردایش آسیا در دو حالت مدار باز و بسته شبیه سازی دینامیکی شد و گذار از یک حالت پایا به حالت پایای دیگر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که واسط کاربری گرافیکی SIMULINK امکانات بی شماری در جهت شبیه سازی دینامیکی واحدهای فرآوری مواد معدنی و امکان شبیه سازی به قصد کنترل فرآیند را فراهم می کند.

کلمات کلیدی

خردایش، مدل سازی، شبیه سازی دینامیکی، SIMULINK

۱- مقدمه

دینامیکی در اختیار می‌گذارد که کنترل فرآیند نیز در آن به سادگی امکان‌پذیر است [۵]، استفاده از این محیط برای توسعه شبیه‌ساز دینامیکی مدار خردایش به عنوان هدف این مقاله در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی دینامیکی مدار خردایش یک آسیا در مدار باز و در مدار بسته با هیدروسیکلون توسط نرم افزار توسعه داده شده در این مقاله نشان داد که محیط محیطی مناسب برای چنین MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی‌هایی است و می‌توان پاسخ دینامیک مدار به تغییرات ورودی از جمله تغییر در دانه‌بندی و تغییر در دبی بار ورودی را به راحتی بررسی کرد.

۱-۱- مزایای MATLAB/SIMULINK

محیط SIMULINK یکی از جعبه‌ابزارهای^۴ توسعه یافته MATLAB است که برای مدل‌سازی، تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی به کار می‌رود. این نرم‌افزار دارای واسط کاربر گرافیکی است و عملگرهای مختلف ریاضیاتی مانند جمع، ضرب، مشتق، انتگرال و غیره به صورت اشکال گرافیکی قابل برداشت از یک کتابخانه نمایش داده می‌شوند. معادلات جبری یا دیفرانسیلی مدل‌ها با استفاده از کنار هم گذاردن این عملگرها وارد نرم افزار می‌شوند و مدل سیستم را می‌سازند. اساس چنین مدل‌سازی بر مفهوم دیگرام‌های بلوکی استوار است که در مهندسی کنترل کاربرد وسیعی دارد [۶].

یک مدل که یک دیگرام بلوکی است و شامل مجموعه‌ای از اشکال گرافیکی است؛ می‌تواند به یک واحد گرافیکی به نام ماسک^۷ تبدیل شود و در کتابخانه ذخیره شود. به‌عنوان مثال می‌توان مدل خردایش یک آسیا را تبدیل به یک ماسک کرده و در کتابخانه ذخیره نمود و هر بار که برای شبیه‌سازی مدار به آن آسیا نیاز است با استفاده از عملیات برداشتن و انداختن^۵، شکل گرافیکی مربوط به آسیا را به صفحه شبیه‌سازی انتقال داد. از اتصال بلوک‌های مختلف می‌توان فلوشیت مدار فرآوری را به راحتی و به شکل گرافیکی ایجاد کرد. نتایج شبیه‌سازی به صورت لحظه‌ای^۸ روی صفحه رایانه

کنترل و بهینه‌سازی روی خط^۱ یک سیستم در صورتی امکان‌پذیر است که مدل دینامیکی سیستم در اختیار باشد. در یک سیستم پایا^۲ ورودی و خروجی سیستم در زمان‌های مختلف ثابت است؛ در حالی که در یک سیستم دینامیک ورودی‌ها و خروجی‌ها نسبت به زمان تغییر می‌کنند. نرم‌افزارهای تجاری مانند BMCS.USIMPAC، MODSIM و JKSimMet که برای شبیه‌سازی فلوشیت، طراحی کارخانه، بهینه‌سازی (خارج از خط) و تحلیل اقتصادی مدارهای فرآوری استفاده می‌شوند، همگی بر اساس حالت پایا هستند و با استفاده از این نرم‌افزارها نمی‌توان رفتار دینامیکی فرآیند را تحلیل کرد و به‌ویژه کنترل فرآیند در آن‌ها ممکن نیست. کنترل و بهینه‌سازی روی خط یک سیستم در صورتی امکان‌پذیر است که مدل سیستم دینامیک باشد. برای مثال شبیه‌ساز نیمه تجاری DYNAPRAG به دلیل در اختیار داشتن مدل‌های دینامیکی قادر به شبیه‌سازی دینامیکی مدار خردایش است [۱]. اگر چه استفاده از شبیه‌سازی پایای مدار خردایش با هدف دستیابی به محصول با کیفیت بهتر و مصرف انرژی کمتر مدت‌ها مورد استفاده بوده است و در کشور ما نیز موارد متعددی گزارش شده است، اما با توجه به اطلاعات نویسندگان، تاکنون در ایران شبیه‌سازی دینامیکی خردایش گزارش نشده است. از معدود فعالیت‌هایی که به طور کلی در زمینه شبیه‌سازی دینامیکی و کنترل واحدهای فرآوری در ایران گزارش شده است می‌توان مطالعات نحوه کنترل سطح در سلول فلوتاسیون ستونی کارخانه نیمه صنعتی مجتمع مس سرچشمه توسط یحیایی و همکاران را نام برد [۲].

با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی می‌توان رفتار غیر خطی و تعامل دینامیکی مدارهای خردایش را بررسی کرد. همچنین شبیه‌سازی دینامیکی برای توسعه و آزمایش ایده‌های جدید برای سنسورهای نرم^۳ و کنترل فرآیند ضروری است [۳، ۴]. با یک محیط MATLAB/SIMULINK توجه به این‌که گرافیکی ساده و مناسب برای شبیه‌سازی سیستم‌های

مدل معادله (۴) بدین معنی است که تغییرات جرم مواد موجود در هر کلاس ابعادی در داخل آسیا برابر با تفاضل کل مواد وارد شده به آن کلاس ابعادی از مقدار کل مواد خارج شده از آن کلاس ابعادی است. مواد وارد شده به هر کلاس ممکن است به طور مستقیم از ورودی آسیا وارد شوند یا از شکست مواد از سایزهای بالایی وارد کلاس ابعادی مورد نظر شوند. معادله (۴) فرم ماتریسی مدل موازنه جمعیتی دینامیک خردایش است که در آن I ماتریس همانی، b ماتریس پایین مثلثی تابع شکست و S تابع انتخاب است. با فرض قابل نرمالیز بودن تابع شکست می توان مقادیر آن را از ماتریس ستونی B که تابع شکست تجمعی است به دست آورد. برای یک آسیا با نگهداشت^۱ ثابت $\frac{dM(t)}{dt} = 0$:

$$\frac{dm(t)}{dt} = (B(t) - I)S(t) m(t) + \frac{1}{\tau(t)} * (f(t) - q(t)) \quad (5)$$

در یک سیستم اختلاط کامل $q(t) = m(t)$:

$$\frac{dq(t)}{dt} = (B(t) - I)S(t) q(t) + \frac{1}{\tau(t)} * (f(t) - q(t)) \quad (6)$$

پارامترهای $B(t)$ و $S(t)$ می توانند تابعی از زمان باشند (به طور مثال با سخت تر شدن خوراک تغییر کنند)، اما در اینجا، به دلیل جلوگیری از پیچیده شدن تحلیل و نتیجه گیری ها، ثابت فرض شده اند. علاوه بر این، اندازه گیری روی خط B و S مشکل است، اما در هر حال اگر امکان اندازه گیری روی خط آنها وجود داشته باشد نرم افزار توانایی متغیر در نظر گرفتن آنها را دارد. جدول ۱ پارامترهای ورودی مدل شامل دانه بندی خوراک، تابع انتخاب و تابع شکست و جدول ۲ پارامترهای سیکلون فرضی را نشان می دهد. در شبیه سازی سیستم دینامیک می بایست نحوه عملکرد واحدهای انتقال مواد را نیز در نظر گرفت، چرا که در سیستم دینامیک زمانی که ذرات صرف انتقال از یک واحد به واحد دیگر می کنند بخشی از عملکرد وابسته به زمان آنها است و می تواند در نتایج تأثیرگذار باشد. با توجه به اینکه سیستم اختلاط نوار نقاله ها از جنس جریان پیستونی است و در لوله ها نیز اغلب از اختلاط شعاعی و محوری چشم پوشی می شود و به صورت

نشان داده می شود. الگوریتمها و پارامترهای شبیه سازی را می توان در حین شبیه سازی تغییر داد. به علاوه کنترل سیستم شبیه سازی شده با SIMULINK به دلیل وجود ابزارهای بسیار قدرتمند کنترل در این محیط به آسانی امکان پذیر است. سایر مزیت های این محیط عبارتند از:

۱. حل گره های معادلات بسیار قدرتمند برای سیستم های غیر خطی و خطی
۲. کتابخانه جامع از بلوک های مختلف برای ایجاد سیستم های خطی، غیر خطی، گسسته یا ترکیبی و با چندین ورودی و خروجی.

۳. اتصال اسکالر و برداری.

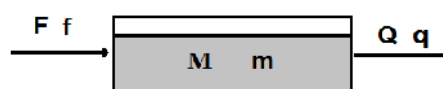
۲- مدل دینامیکی مدار خردایش

برای یک آسیا با یک سیستم اختلاط کامل^۱ اگر $m(t)$ ، $f(t)$ و $q(t)$ به ترتیب بردار درصد مواد جامد در فراکسیون های ابعادی مجزا (توزیع دانه بندی) در محیط داخل آسیا، ورودی آسیا و خروجی آسیا و F و Q به ترتیب دبی بار ورودی و دبی بار خروجی باشند (شکل ۱)، مدل کلی یک آسیای گلوله ای در حالت دینامیک به صورت زیر قابل ارائه است:

$$m(t) = [m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t)] \quad (1)$$

$$f(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)] \quad (2)$$

$$q(t) = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)] \quad (3)$$



شکل ۱: یک آسیای با سیستم اختلاط کامل

$$\frac{d(M(t)m(t))}{dt} = (b(t) - I)S(t)(M(t)m(t)) + F(t)f(t) - Q(t)q(t) \quad (4)$$

سیستم $(B-I)*S$ در شکل ۲ را نشان می‌دهد که در معادله (۶) استفاده شده است. از بلوک Matrix Multiply برای ضرب کردن، از بلوک Matrix Sum برای تفریق و جمع مقادیر به صورت ماتریس و یا برداری و از بلوک Scope برای بررسی تغییرات و مشاهده نتیجه نسبت به زمان در هر نقطه از مدار استفاده شده است. برای وارد کردن مقادیر ثابت، برداری و حتی ماتریسی از بلوک Constant استفاده شده است. در نهایت برای حل معادله $\frac{dm(t)}{dt}$ از بلوک Integrator و حل گر Ode 45 با گام زمانی متغیر استفاده شد. دیاگرام بلوکی شکل ۲ به وسیله زیر سیستم‌سازی به مدار ساده شکل ۴ قابل تبدیل است. پس از اعتبارسنجی شبیه‌ساز (بخش ۴) و اطمینان از صحت عملکرد آن، اثر تغییر خوراک جامد ورودی (دبی و یا دانه‌بندی) تحلیل و بررسی شد. برای شبیه‌سازی اثر تغییرات دبی خوراک از بلوک پالس^{۱۳} و برای تغییر درصد ذرات در فراکسیون‌های مختلف از بلوک سوئیچ^{۱۴} استفاده شد. با تغییر در هر بخش و سپس اجرا کردن برنامه می‌توان اثر تغییرات را مشاهده کرد. بلوک‌های پالس و سوئیچ برای ایجاد نوسان و تغییر دانه‌بندی ورودی استفاده شده‌اند.

جدول ۲: پارامترهای سیکلون

واحد	مقدار	
سانتی‌متر	۳۸	قطر سیکلون
متر	۱/۱۴	فاصله ورتکس-اسپیگات
متر	۰/۰۷۶	قطر ورودی
متر	۰/۰۶۳	قطر ورتکس
متر	۰/۰۴۴	قطر اسپیگات

۳-۱-۱ - پاسخ سیستم به تغییر دبی جامد ورودی

برای شبیه‌سازی مدار خردایش ذرات در ۱۸ فراکسیون ابعادی مختلف از ۳۳۶۰ تا کمتر از ۱۳ میکرون بررسی شده‌اند. برای بررسی پاسخ سیستم به تغییر دبی، در زمان ۸ دقیقه، دبی سیستم با استفاده از ابزار پالس از ۴۶۰ به ۷۶۰ تن بر ساعت تغییر داده شد و این دبی تا دقیقه ۱۶ در ۷۶۰ تن بر ساعت حفظ شد. به دلیل اینکه نمودارهای پاسخ سیستم در محیط SIMULINK کیفیت لازم برای ارائه در فرم سیاه و سفید

جریان پیستونی در نظر گرفته می‌شوند، وجود بخش‌های انتقال مواد فقط منحنی‌های زمان ماند مواد در کل سیستم را با یک تأخیر^{۱۱} مواجه می‌سازد که به صورت یک جابجایی^{۱۲} در منحنی بروز خواهد کرد و شکل منحنی‌ها را تغییر نخواهد داد. در نتیجه دینامیسم سیستم تغییری نخواهد کرد، اگر چه اثرات مربوط به تغییرات در ورودی‌ها دیرتر از محاسبات در خروجی‌ها دیده می‌شود. در این مقاله، از این تأخیر صرف نظر شده است.

جدول ۱: پارامترهای ورودی مدل شامل خوراک، تابع انتخاب و تابع شکست تجمعی

S	B	درصد مواد مانده روی هر سرند در خوراک	ابعاد سرندها (μm)
۱/۹۴۹	۱	۰/۵	۴۷۶۰
۱/۳۷۸	۰/۷۰۷	۱	۳۳۶۰
۰/۹۷۴	۰/۵	۱/۵	۲۳۸۰
۰/۶۸۹	۰/۳۵۳	۴	۱۳۸۰
۰/۴۸۷	۰/۲۵	۶	۱۱۹۰
۰/۳۴۵	۰/۱۷۷	۹/۹	۸۴۱
۰/۲۴۴	۰/۱۲۵	۱۲/۳	۵۹۵
۰/۱۷۲	۰/۰۸۸	۱۰/۳	۴۲۰
۰/۱۲۲	۰/۰۶۲	۸/۷	۲۹۷
۰/۰۸۶	۰/۰۴۴	۷/۲	۲۱۰
۰/۰۶۱	۰/۰۳۱	۶/۲	۱۴۹
۰/۰۴۳	۰/۰۲۲	۵/۲	۱۰۵
۰/۰۳۰	۰/۰۱۶	۴/۲	۷۴
۰/۰۲۲	۰/۰۱۱	۳/۸	۵۳
۰/۰۱۵	۰/۰۰۸	۳/۱	۳۷
۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۲/۷	۲۶
۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۲	۱۸
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۱/۴	۱۳

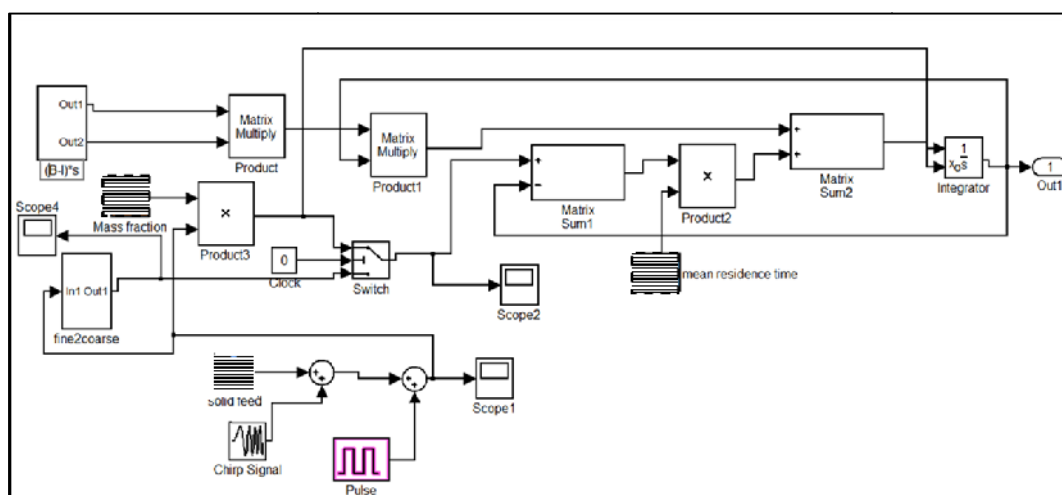
۳- ساخت شبیه ساز مدار خردایش در محیط SIMULINK

۳-۱ - شبیه‌سازی یک آسیای گلوله‌ای در مدار باز پیاده‌سازی معادله (۶) در محیط SIMULINK منجر به تولید دیاگرام بلوکی شکل ۲ می‌شود. اکنون‌هایی که با هاشور مشخص شده‌اند، پارامترهای ورودی را نشان می‌دهند. برای جلوگیری از شلوغ شدن صفحه می‌توان از خاصیت زیر سیستم‌سازی SIMULINK استفاده کرد. شکل ۳ زیر

نمایش داده شده‌اند، در حالی که شبیه‌سازی‌ها برای ۱۸ کلاس ابعادی انجام شده است و اطلاعات مربوط به تغییرات درصد مواد در تمام این ۱۸ کلاس موجود بوده است.

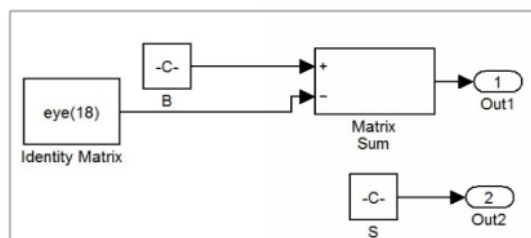
را نداشتند، با استفاده از ابزار to workspace داده‌ها به EXCEL انتقال داده شدند و در محیط EXCEL نمودارها

رسم شد. به علاوه به منظور جلوگیری از شلوغی بیش از حد منحنی‌ها در شکل‌های آتی، فقط چند کلاس ابعادی محدود

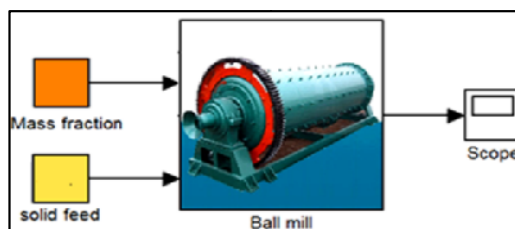


شکل ۲: شبیه‌سازی مدل یک آسیا در محیط SIMULINK.

خوراک در یک لحظه (دقیقه ۸) اتفاق افتاده است، ولی همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تأثیر این تغییر لحظه‌ای بر دانه‌بندی خروجی آسیا لحظه‌ای نیست. با توجه به دینامیک بودن شبیه‌سازی، حتی اگر تمام ورودی‌ها ثابت باشند، مدتی زمان نیاز است که سیستم به حالت تعادل (سیستم پایا) برسد. مطابق شکل ۵-ب حدود ۳ دقیقه لازم بوده است تا مدار به حالت پایا برسد که این مرحله، مرحله گذار^{۱۵} نامیده می‌شود. در صورتی که آسیای صنعتی نیز از حالت خاموش به کار انداخته شود، به‌طور دقیق چنین مرحله‌گذاری را تجربه خواهد کرد، بنابراین یکی از کاربردهای چنین شبیه‌سازی تخمین شرایط شروع به کار^{۱۳} دستگاه‌ها است.



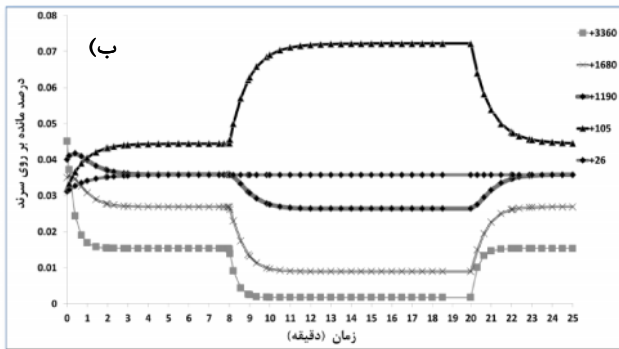
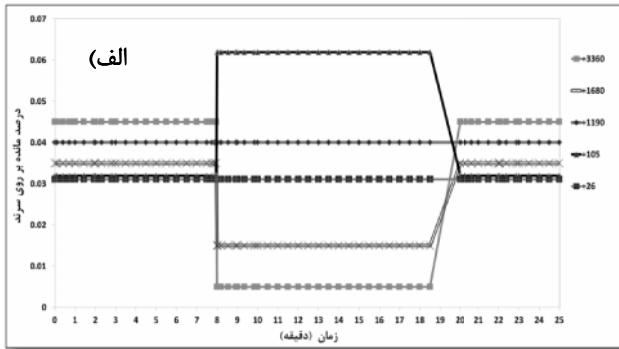
شکل ۳: زیر سیستم $(B-I)*S$



شکل ۴: بلوک آسیای گلوله‌ای

در فاصله زمانی ۳ تا ۸ دقیقه سیستم در حالت پایا قرار دارد و دوباره با تغییر دبی ورودی در لحظه ۸ دقیقه به دلیل این‌که با زمان ماند ثابت، دبی افزایش یافته است و ذرات فرصت کافی برای خرد شدن ندارند، در نتیجه درصد ذرات در فراکسیون‌های درشت افزایش یافته است و درصد ذرات در

شکل ۵-ب تغییرات میزان مواد مانده بر روی سرنده (بر حسب درصد) در ابعاد مختلف نسبت به تغییر دبی جامد ورودی (شکل ۵-الف) را نشان می‌دهد. در این آسیا تغییر دبی جامد

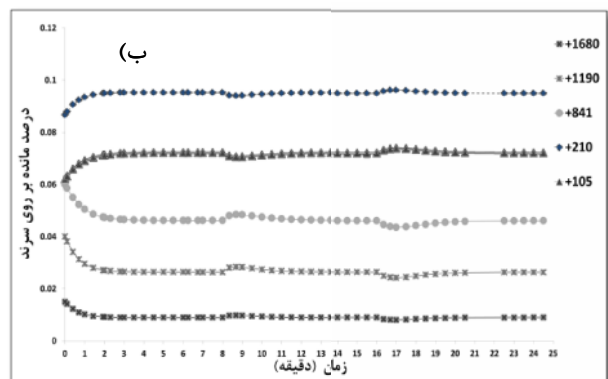
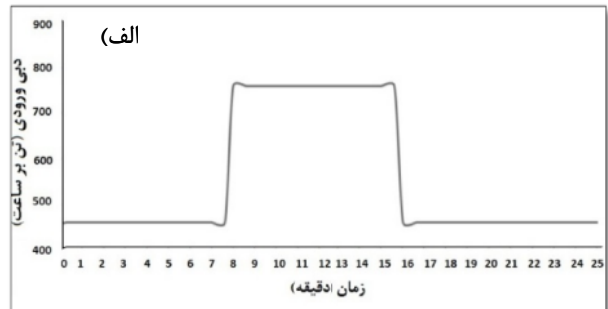


شکل ۶: پاسخ سیستم به تغییر ابعاد ورودی (الف) درصد مانده بر روی سرنده در خوراک و (ب) درصد مانده بر روی سرنده در خروجی آسیا (اندازه سرندها بر حسب میکرون می باشد).

۳-۱-۲ - پاسخ سیستم به تغییر ابعاد ذرات

در اینجا برای بررسی پاسخ سیستم به تغییر ابعاد ذرات از ابزار سوئیچ برای تغییر ابعاد به صورت لحظه‌ای در زمان ۸ و ۲۱ دقیقه استفاده شد. در این مرحله به‌عنوان مثال فراکسیون‌های (تغییر به گونه‌ای است که مجموع درصد مواد مانده بر روی سرندها برابر ۱ شود)، به‌همین دلیل در برخی از فراکسیون‌های ابعادی کاهش درصد مواد وجود دارد (شکل ۶ الف). در برخی از فراکسیون‌های ورودی نیز تغییری اعمال نشده است. شکل (۶-ب) پاسخ سیستم به تغییر اعمال شده در دانه‌بندی ورودی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برخی از فراکسیون‌ها به سرعت و برخی به کندی به حالت پایا می‌رسند. در نهایت در زمان ۲۴ دقیقه همه فراکسیون‌ها و در نتیجه دانه‌بندی به حالت پایا رسیده است. با استفاده از سیستم‌های کنترلی می‌توان زمان رسیدن به حالت

فراکسیون‌های ریز کاهش یافته است. در این مرحله نیز در فاصله زمانی ۸ تا ۱۲ دقیقه یک حالت گذار وجود دارد و در فاصله زمانی ۱۲ تا ۱۶ دقیقه سیستم در حالت پایا بوده است. در لحظه ۱۶ دقیقه با کاهش دبی، دوباره یک حالت گذار دیده می‌شود که تا دقیقه ۲۰/۵ وجود دارد و در دقیقه ۲۰/۵ سیستم به حالت پایا می‌رسد. اثر افزایش دبی بر روی فراکسیون‌های ابعادی که درصدشان در خوراک بیشتر است، بیشتر منعکس شده است. نکته جالب توجه این است که زمان لازم برای گذار از یک حالت پایا به حالت پایای جدید در دو وضعیت افزایش و کاهش دبی یکسان نیست؛ برای مثال اگر چه هنگام افزایش دبی از ۴۶۰ به ۷۶۰ تن بر ساعت، ۴ دقیقه لازم بوده است که سیستم به حالت پایای جدید برسد، هنگامی که دبی از مقدار ۷۶۰ به مقدار اولیه خود (۴۶۰) بازگشته است، ۴/۵ دقیقه لازم بوده است تا سیستم به حالت پایای اولیه بازگردد.



شکل ۵: پاسخ سیستم به تغییر دبی ورودی (الف) دبی ورودی (تن بر ساعت) و (ب) درصد مانده بر روی هر سرنده نسبت به زمان در خروجی آسیا (اندازه سرندها بر حسب میکرون است).

پایا را کاهش داد که این موضوع در این مقاله بحث نخواهد شد.

۲-۳- شبیه سازی آسیا در مدار بسته

شکل ۷ یک آسیا را در مدار بسته با سیکلون در محیط SIMULINK نشان می دهد. محیط گرافیکی SIMULINK این امکان را فراهم می آورد که به سادگی و بدون نیاز به الگوریتم های پیچیده همگرایی، مدار بسته را شبیه سازی کرد. با توجه به زمان ماند بسیار کوتاه مواد در داخل سیکلون می توان از مدل پلیت^{۱۶} برای شبیه سازی دینامیک سیکلون در محیط SIMULINK استفاده کرد.

در شکل ۷، F_s و F_w به ترتیب نرخ جریان جامد و آب ورودی به آسیا و Q_s و Q_w نرخ جریان جامد و آب خروجی از آسیا و ورودی به سیکلون (بر حسب تن بر ساعت) است. f و q دانه بندی خوراک ورودی و محصول آسیا بر حسب درصد مواد باقیمانده بر روی سرند هستند و taw میانگین زمان ماند آسیا است که از تقسیم نگهداشت آسیا (۴۰ تن) بر نرخ جریان (جامد و آب) به دست می آید. U_s و U_w به ترتیب نرخ جامد و آب خروجی از ته ریز سیکلون و O_s و O_w نرخ جامد و آب خروجی از سر ریز سیکلون (بر حسب تن بر ثانیه) می باشند. u و o نیز به ترتیب دانه بندی ته ریز و سر ریز سیکلون (بر حسب درصد مواد باقیمانده بر روی سرند) هستند. به سادگی می توان اثر هر یک از پارامترهای ورودی را با اجرا کردن مدل و تغییر آن پارامتر، مشاهده نمود. در اینجا برای نمونه فقط اثر تغییر ابعاد ذرات ورودی به آسیا نشان داده شده است.

با استفاده از بلوک MATLAB FUNCTION می توان یک M-File نوشته شده در برنامه MATLAB را در محیط SIMULINK اجرا کرد که در اینجا برای رسم منحنی جدایش از این امکان استفاده شده است.

۲-۳-۱- پاسخ سیستم به تغییر ابعاد ذرات ورودی

پس از اعتبارسنجی آسیا (بخش ۴)، برای بررسی چگونگی پاسخ سیستم مدار بسته آسیا و سیکلون به تغییر ابعاد ذرات،

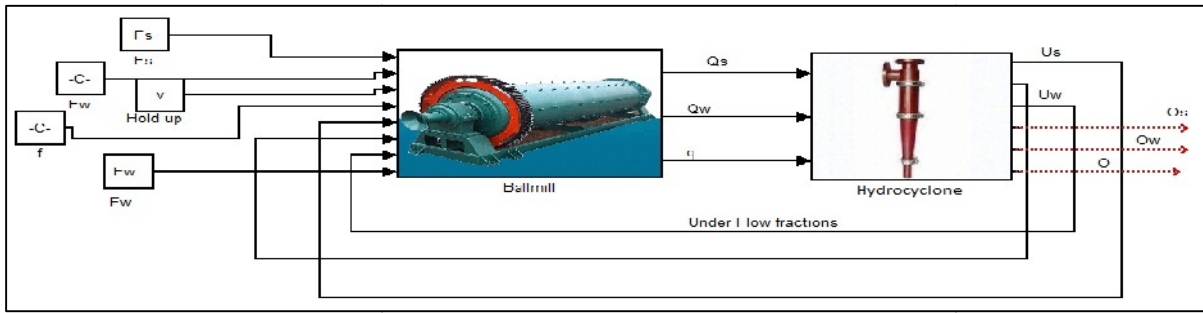
ابعاد ذرات در بازه زمانی ۸ تا ۲۰ دقیقه تغییر داده شد. با توجه به شکل ۸ مشخص است که هم در خروجی آسیا (ب) و هم در سر ریز سیکلون (ج) درصد مواد در فراکسیون های متوسط و ریز افزایش و در فراکسیون های درشت کاهش داشته است. هم در خروجی آسیا و هم در سر ریز سیکلون در بازه زمانی ۰ تا ۴ دقیقه حالت گذار دیده می شود و در بازه زمانی ۴ تا ۸ دقیقه سیستم به حالت پایا رسیده است. در زمان ۸ دقیقه با افزایش ابعاد ذرات خوراک دوباره هم در سر ریز و ته ریز سیکلون و هم در خروجی آسیا حالت گذار مشاهده می شود که این حالت گذار تا دقیقه ۱۲ ادامه دارد و دوباره از دقیقه ۱۲ تا دقیقه ۲۰ سیستم در حالت پایا بوده است. در فاصله زمانی ۲۰ تا ۲۴ دقیقه با کاهش ابعاد ذرات نیز یک حالت گذار دیده می شود و سپس دوباره سیستم به حالت پایا می رسد. همان گونه که از شکل ۸ ب، ج و د مشخص است تغییر ابعاد ذرات در فاصله زمانی ۸ تا ۲۰ بر روی سر ریز سیکلون نسبت به ته ریز سیکلون و خروجی آسیا اثر کمی داشته است و این نکته نشان می دهد که استفاده از مدار بسته با سیکلون برای بدست آوردن محصول یکنواخت بسیار مؤثر است.

۴- اعتبارسنجی مدل

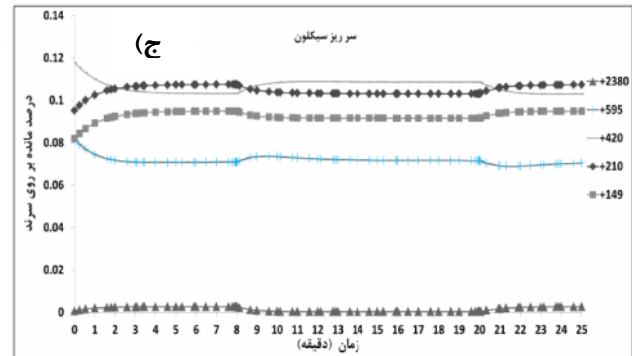
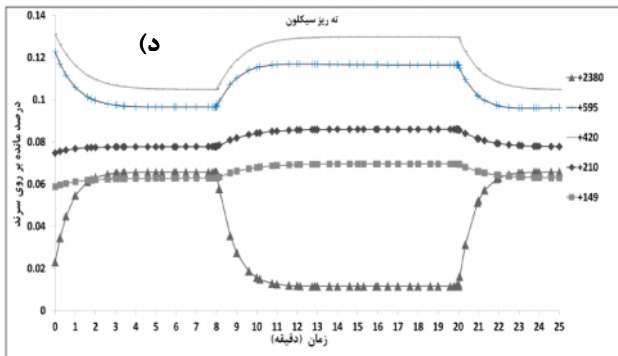
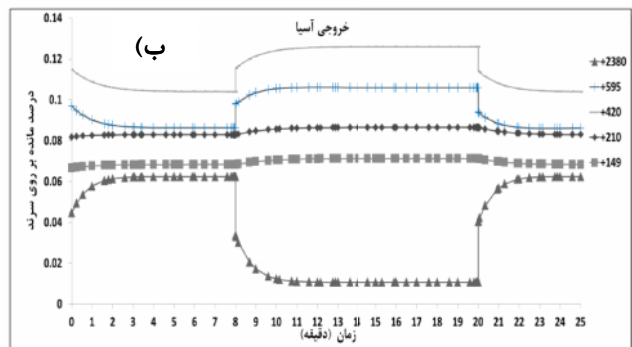
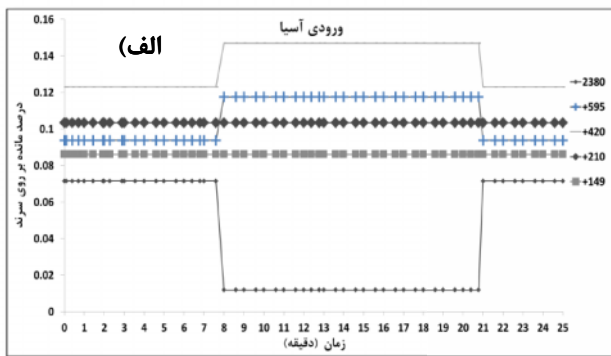
اعتبارسنجی شبیه ساز ساخته شده به دو شکل امکان پذیر است: ۱- مقایسه نتایج شبیه سازی دینامیکی این نرم افزار برای یک مجموعه داده ورودی با نتایج شبیه سازی با همان داده های ورودی توسط یک نرم افزار تجاری (یا آکادمیک) تست شده. ۲- نمونه برداری دینامیکی از بخش های مختلف یک مدار و مقایسه شبیه سازی ها با داده های حاصل از نمونه برداری. با توجه به در دسترس نبودن نرم افزار دینامیک تجاری دیگر برای مدار خردایش، گزینه اول منتفی است. نمونه برداری دینامیکی از یک مدار خردایش نیز اگر چه در دستور کار این تیم تحقیقاتی است، ولی با توجه به هزینه بالای چنین نمونه برداری، زمانی توجیه پذیر است که اهداف کنترلی مد نظر باشد. بنابراین چنین داده هایی نیز در حال حاضر در دسترس نبوده است. ولی برای نشان دادن اینکه معادلات به کار رفته

استفاده شده است.

به درستی در شبیه‌ساز پیاده شده‌اند، از یک راه حل ابتکاری



شکل ۷: شبیه‌سازی آسیا و سیکلون در محیط SIMULINK



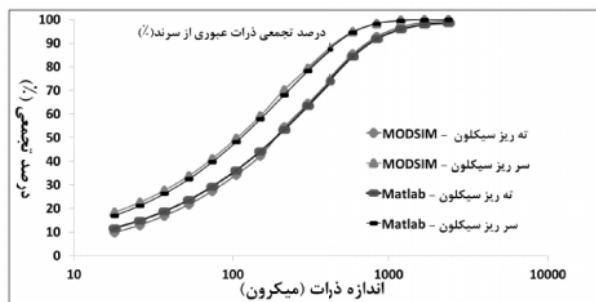
شکل ۸: پاسخ سیستم بسته آسیا و سیکلون به تغییر ابعاد ذرات ورودی (در فاصله زمانی ۸ تا ۲۰ دقیقه ابعاد ذرات ورودی آسیا افزایش یافته است) (الف) خوراک ورودی آسیا، (ب) خروجی آسیا، (ج) سرریز سیکلون و (د) ته‌ریز سیکلون.

توسط نرم افزار MODSIM و نیز توسط نرم افزار توسعه داده شده در این مقاله را در حالتی که تمام ورودی‌های آن ثابت بوده‌اند نشان می‌دهد. تطابق عالی بین نتایج این دو شبیه ساز نشان دهنده این است که پیاده‌سازی مدل معادله (۶) در محیط SIMULINK دچار اشکال نیست. با توجه به ماهیت پدیده شناختی^{۱۸} مدل‌ها، تا زمانی که فرضیات توسعه مدل (مانند درجه یک بودن واکنش خردایش یا اختلاط کامل در آسیا) برقرار باشد، شبیه ساز درست عمل خواهد کرد.

در صورتی که تمام ورودی‌های یک مدل دینامیک نسبت به زمان ثابت باشند و تجمع^{۱۷} نیز در داخل راکتور اتفاق نیفتد، آن مدل می‌بایست همانند یک مدل پایا عمل کند. به عبارت دیگر شبیه‌ساز دینامیک می‌بایست توانایی شبیه‌سازی صحیح سیستم پایا را نیز داشته باشد. از آنجایی که برای شبیه‌سازی در حالت پایا نرم افزارهای متفاوتی در دسترس است، بنابراین می‌توان شبیه‌ساز توسعه داده شده در این مقاله را در حالتی که مانند سیستم پایا عمل می‌کند با شبیه‌سازهای دیگر مقایسه کرد. شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی یک مدار خردایش

منابع

- [1] Lestage, R., A. Pomerleau, and D. Hodouin, *Constrained real-time optimization of a grinding circuit using steady-state linear programming supervisory control*. Powder technology, 2002. **124**(3): p. 254-263.
- [2] Yahyaei, M. and S. Banisi. *Control strategy of the flotation column at the pilot plant of Sarcheshmeh copper complex*. in *Iranian mining engineering conference*. 2004.
- [3] Fortuna, L., *Soft sensors for monitoring and control of industrial processes*. 2007: Springer Verlag.
- [4] Pomerleau, A., et al., *A survey of grinding circuit control methods: from decentralized PID controllers to multivariable predictive controllers*. Powder technology, 2000. **108**(2-3): p. 103-115.
- [5] Tewari, A., *Modern control design: with MATLAB and SIMULINK*. 2002: Wiley.
- [6] Ogata, K., *Modern control engineering, 1997*, Prentice-Hall Inc., NJ.



شکل ۹: مقایسه منحنی دانه بندی ذرات سرریز و ته ریز سیکلون

در نرم افزار توسعه داده شده در این مقاله (Matlab) و

MODSIM.

۵- نتیجه گیری

با استفاده از نرم افزارهای تجاری موجود که همگی در حالت پایا کار می کنند نمی توان رفتار دینامیکی فرایند و حالت گذرای سیستم (به عنوان مثال تغییر توزیع ابعادی بار ورودی آسیا) را تحلیل کرد، بنابراین کنترل فرایند در آن ها ممکن نیست. شبیه سازی مدار خردایش یک آسیا در مدار باز و در مدار بسته با هیدروسیکلون در محیط MATLAB/SIMULINK، برای بررسی پاسخ گویی مدار به تغییرات بار ورودی انجام شد. نتایج نشان داد که محیط MATLAB/SIMULINK می تواند با در اختیار قرار دادن ابزارهای مناسب برای پیاده سازی مدل ها، حل آن ها و در نهایت شبیه سازی سیستم دینامیک، امکان ساخت شبیه سازهای گرافیکی مناسب برای مهندسين فرآوری را برآورده سازد. با بررسی پیوسته متغیرهای خروجی شبیه ساز می توان با کنترل و تغییر متغیرهای ورودی (مانند درصد جامد و دبی) به خروجی با اندازه مطلوب دست یافت و نیز اثرات ناپایا شدن سیستم را مشاهده کرد. شبیه ساز حاضر می تواند برای شبیه سازی، بهینه سازی و کنترل پیوسته مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، با ثابت نگاه داشتن مقدار متغیرهای ورودی نسبت به زمان می توان از این نرم افزار برای شبیه سازی پایا نیز استفاده کرد.

پی نوشت

- | | | |
|-----------------------|----------------------------|--------------------------------|
| ^۱ Online | ^۲ Steady state | ^۳ Soft sensors |
| ^۴ Toolbox | ^۵ Drag and drop | ^۶ Sub- System |
| ^۷ Mask | ^۸ Online | ^۹ Perfect Mixer |
| ^{۱۰} Hold up | ^{۱۱} Delay | ^{۱۲} Shift |
| ^{۱۳} Pulse | ^{۱۴} Switch | ^{۱۵} Transient stage |
| ^{۱۶} Plitt | ^{۱۷} Accumulation | ^{۱۸} Phenomenological |