

شبیه‌سازی حالت پایدار مدارهای آسیای گلوله‌ای و هیدروسیکلون در صفحه گسترده با استفاده از نرم افزار COMSOL

سید محمد رضویان، مهدی ایران‌نژاد*⁺

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

اکبر فرزنانگان

کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی معدن

چکیده: برنامه COMSOL با هدف شبیه‌سازی مدارهای آسیاکردن صنعتی متشکل از آسیاهای گلوله‌ای و هیدروسیکلون در محیط صفحه گسترده اکسل توسعه یافته است. در این برنامه برای شبیه‌سازی عملکرد آسیاهای گلوله‌ای از روش مدل‌سازی موازنه جمعیتی استفاده شده است. در مدل آسیای گلوله‌ای، پارامترهای مورد نیاز زمان‌های اقامت متوسط مربوط به مدل‌های توصیف‌کننده زمان اقامت ذره‌های درون آسیا، تابع انتخاب و تابع توزیع شکست هستند. برای شبیه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون‌ها از دو مدل پلیت و ناگسوارا راتو که از نوع مدل‌های تجربی هستند، استفاده شده است. این دو مدل بر اساس ویژگی‌های هندسی هیدروسیکلون و ویژگی‌های پالپ ورودی، عملکرد هیدروسیکلون را پیش‌بینی می‌کنند. در این برنامه می‌توان مدارهای با چیدمان‌های متفاوت تشکیل شده از آسیا و هیدروسیکلون را شبیه‌سازی کرد. نتیجه‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در کارخانه مقایسه شده، درستی و دقت آن مورد بررسی و آزمون قرار گرفته است. شبیه‌سازی و نتیجه‌ها، نشان‌دهنده عملکرد قابل اطمینان نرم‌افزار در شبیه‌سازی‌های متفاوت است. از ویژگی‌های این شبیه‌ساز کاربری آسان، تغییر سریع و آسان داده‌های ورودی، کنترل داده‌های اشتباه، نمایش چندگانه جریان‌های متفاوت و همچنین نمایش نموداری نتیجه‌های شبیه‌سازی است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، مدل‌سازی، آسیای گلوله‌ای، هیدروسیکلون، اکسل.

KEY WORDS: Simulation, Modelling, Ballmill, Hydrocyclone, Excel.

مقدمه

مدل‌های ریاضی دستگاه‌های فرآوری ساخته می‌شوند و درحقیقت مدل‌های ریاضی به‌کار گرفته شده در شبیه‌سازها هستند که قابلیت و توانایی آنها را تعیین می‌کنند. به‌طور کلی سه نوع مدل

شبیه‌سازی فرایند، ابزاری مهم برای یک مهندس فرآوری مواد معدنی است. موارد اصلی کاربرد شبیه‌سازی شامل طراحی، بهینه‌سازی و کنترل سیستم‌های فرآوری است. شبیه‌سازها بر مبنای

*E-mail: iranajad@aut.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

که m_i ، S_i و b_{ij} به ترتیب وزن ذره‌ها در طبقه سرنده i ام، تابع انتخاب طبقه سرنده i ام و تابع شکست غیر تجمعی ذره‌ها از طبقه سرنده i ام به طبقه سرنده j ام هستند. شکل ماتریسی حل معادله‌ی (۱) به صورت زیر است:

$$\vec{m}(t) = T \exp[-St] T^{-1} \vec{m}(0) \quad (2)$$

که در آن $\vec{m}(t)$ بردار توزیع اندازه ذره‌ها در زمان t و T ماتریس مربع تبدیل خطی برای حل دستگاه معادله‌های دیفرانسیلی داده شده در معادله‌ی (۱) است. درایه‌های ماتریس T از معادله‌های بازگشتی زیر محاسبه می‌شوند.

$$T: t_{i,j} = \begin{cases} 0 & i < j \\ S_j & i = j \\ \frac{1}{S_i - S_j} \sum_{k=1}^{j-1} b_{i,k} S_k t_{k,j} & i > j \end{cases} \quad (3)$$

با در نظر گرفتن توزیع زمان اقامت (RTD)^(۴) مواد در آسیاهای پیوسته مدل ریاضی این نوع آسیاها به دست می‌آید. براساس مدل توزیع زمان اقامت ولر^(۸)، بردار توزیع اندازه‌ی ذره‌های خروجی در آسیاهای پیوسته از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{m}_d = T [I + \vec{S} \tau_s]^{-n} [I + \vec{S} \tau_1]^{-1} \exp[-\vec{S} \tau_{pf}] T^{-1} \vec{m}_f \quad (4)$$

که در آن:

\vec{m}_d : بردار توزیع اندازه‌ی ذره‌ها خروجی آسیا

T : ماتریس مربع تبدیل خطی

S : ماتریس مربع قطری تابع انتخاب

τ_s ، τ_1 و τ_{pf} : پارامترهای مدل ولر و

\vec{m}_f : بردار توزیع اندازه‌ی ذره‌های ورودی به آسیاست.

چنانچه از مدل $1PF+nPM$ برای توزیع زمان اقامت استفاده شود، بردار توزیع اندازه‌ی ذره‌های خروجی آسیاهای پیوسته از معادله‌ی (۵) محاسبه می‌شود:

$$\vec{m}_d = T [I + \vec{S} \tau_1]^{-n} \exp[-\vec{S} \tau_{pf}] T^{-1} \vec{m}_f \quad (5)$$

که τ و n به ترتیب میانگین توزیع زمان اقامت در هر مخزن مخلوط کامل و تعداد مخازن مخلوط کامل هستند.

وجود دارند که می‌توانند مبنای شبیه‌سازی فرایند قرار گیرند: تجربی^(۱)، پدیده‌شناختی^(۲) و بنیادی^(۳). با توسعه مدل‌ها و پدید آمدن مدل‌های بنیادی، جزئیات مدل‌ها و محاسبه‌ها و در نتیجه دقت آنها افزایش می‌یابد. در مدل‌های تجربی، هرچند دقت مدل‌ها به نسبت کم‌تر است ولی دارای محاسبه‌های ساده‌تر هستند [۱]. برنامه COMSIM^(۴) [۲] بر اساس مدل‌های موازنه جمعیتی و تجربی فرایندهای آسیا و طبقه‌بندی را شبیه‌سازی می‌کند. این شبیه‌ساز در محیط آشنای اکسل^(۵) و با استفاده از توانایی‌های این محیط مانند قابلیت ماکرونویسی به وسیله‌ی VBA^(۶)، تهیه شده است. از جمله قابلیت‌های این شبیه‌ساز نسبت به شبیه‌سازهای مشابه، کاربری آسان، سرعت بالا، دقت و نمایش نموداری نتیجه‌هاست.

روش شبیه‌سازی

مدل‌های آسیا

مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی عملکرد آسیای گلوله‌ای در COMSIM مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از نوع مدل‌های موازنه جمعیتی هستند. مدل‌های موازنه جمعیتی ارایه شده برای آسیاهای گلوله‌ای متناسب با موازنه آهنگ ذره‌های ورودی و خروجی هستند که خود از نوع پدیده‌شناختی بوده و برای تعیین پارامترهای آنها نیاز به انجام آزمایش‌های فراوان است. با توجه به این مورد، برای شبیه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای در مقیاس صنعتی برای یک کارخانه ویژه، نیاز به انجام مرحله‌ها و دقت بسیار برای کالیبره کردن مدل ریاضی کلی است. به‌طور مختصر این مراحل شامل دقت در نمونه‌برداری، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای تابع شکست و تجزیه اندازه‌ی ذره‌های ورودی و خروجی آسیا، برآورد تابع انتخاب، ارزیابی مدل و در نهایت اجرای شبیه‌ساز است.

مدل فرایند آسیای پیوسته براساس سیستم آسیای ناپیوسته ارایه شده است. رابطه‌ی ای که برای آسیای ناپیوسته توسط لاک‌ی و آستین ارایه شده است، به صورت معادله (۱) است [۳]:

$$\frac{dm_i}{dt} = -S_i m_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j m_j \quad (1)$$

(۱) Empirical

(۲) Phenomenological

(۳) Fundamental

(۴) Comminution simulator

(۵) Excel

(۶) Visual basic for applications

(۷) Residence time distributio

(۸) Weller

تابع شکست

مدل دیگر شامل یک مخزن با جریان قالبی و n مخزن با جریان مخلوط کامل است [۶]. معادله‌ی (۷) شکل ریاضی این مدل را نشان می‌دهد.

$$E(t) = \frac{n^2(t - \tau_{pf})^{n-1} \exp\left(\frac{-n(t - \tau_{pf})}{\tau_t}\right)}{\tau_t^n (n-1)!} \quad (7)$$

برای تعیین توزیع زمان اقامت ذره‌ها از یک ماده ردیاب استفاده می‌شود. پارامترهای مدل‌های بالا را می‌توان با روش‌های برازش خم بر نقاط داده مربوط به آزمایش توزیع زمان اقامت به وسیله‌ی برنامه‌های عمومی مانند Excel یا برنامه‌های تخصصی مانند RTDBOTH تعیین کرد.

مدل‌های هیدروسیکلون

به طور کلی دو مدل تجربی معروف برای شبیه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون‌ها وجود دارند که در بیشتر شبیه‌سازهای کامپیوتری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این دو مدل که بر مبنای آزمایش‌های آزمایشگاهی استوار هستند توسط پلیت و ناگسوارارائو توسعه یافته‌اند. هر دو مدل بر ارتباط تجربی بین متغیرهای انتخابی تکیه دارند. علی‌رغم وجود برخی شباهت‌ها، این دو مدل دارای تفاوت‌هایی در ساختار و نوع متغیرهای انتخابی هستند که گاهی می‌تواند باعث پیش‌بینی عملکرد نامنطبق هیدروسیکلون‌ها در شبیه‌سازی شود.

مدل پلیت

در سال ۱۹۷۶ میلادی پلیت مدل هیدروسیکلون خود را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی فراوان و در محدوده‌ای گسترده ارایه کرد [۷]. این مدل عملکرد هیدروسیکلون‌ها را با استفاده از چهار معادله تجربی توصیف می‌کند.

در این مدل شاخص‌های اصلی عملکرد هیدروسیکلون حد جدایش تصحیح شده، تقسیم جریان بین سرریز و ته ریز، تیزی یا دقت جدایش و افت فشار هستند. این پارامترها برحسب متغیرهای عملیاتی و طراحی هیدروسیکلون محاسبه می‌شوند. شکل رایج مدل پلیت که توسط فلینتاف و همکارانش در سال ۱۹۸۷ میلادی ارایه شده است به اندازه بار اولیه بستگی ندارد [۸]. پارامترهای اصلی که در مدل پلیت به کار می‌روند، به صورت معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند [۹]:

تابع (توزیع) شکست یکی از پارامترهای اساسی در مدل آسیای گلوله‌ای است که با انجام آزمایش‌های شکست روی نمونه‌های نماینده کانسنگ تعیین می‌شود. به‌طور معمول روش‌های مستقیم سقوط وزنه و آونگ دوقلو و روش غیر مستقیم آسیاکردن نمونه پودر برای تعیین تابع شکست به کار می‌روند. برنامه BFDS^(۱) برای تعیین تابع شکست بر اساس داده‌های آزمایش آسیا کردن نمونه‌های پودر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که در جای دیگر مورد بحث قرار گرفته است [۴].

تابع انتخاب

این تابع شاخص سینتیک فرایند آسیاشدن مواد می‌باشد و بستگی به عامل‌های متفاوتی مثل ویژگی‌های کانه، قطر آسیا، سرعت گردش آسیا، اندازه و جنس گلوله‌ها دارد. پس از شکسته شدن، مواد از یک طبقه سرنندی خرد شده و وارد طبقات بعدی می‌شوند. ناپدید شدن مواد از یک طبقه سرنندی در آسیاهای گلوله‌ای بیشتر از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند و نرخ ناپدید شدن مواد از یک طبقه سرنندی متناسب با جرم مواد درون آن طبقه سرنندی است. تابع انتخاب با استفاده از روش‌های تخمین پارامتری به دست می‌آید. با در دست داشتن داده‌های مربوط به توزیع اندازه‌ی ذره‌های ورودی و خروجی یک آسیا پیوسته (صنعتی) و معلوم بودن شرایط عملیاتی کارخانه، می‌توان از برنامه NGOTC^(۲) برای تعیین مقادیر تابع انتخاب همه طبقات اندازه‌ی ذره‌ها استفاده کرد [۵].

توزیع زمان اقامت

برای توصیف توزیع زمان اقامت (RTD) ذرات درون آسیای صنعتی پیوسته در COMSIM، دو مدل معروف انتخاب شده است. نخستین مدل با عنوان مدل ولر است که در سال ۱۹۸۰ میلادی توسط ولر ارایه شد [۶]. این مدل شامل یک مخزن با جریان قالبی، دو مخزن کوچک با جریان مخلوط کامل و یک مخزن بزرگ با جریان مخلوط کامل است که به دنبال هم قرار گرفته‌اند. معادله‌ی (۶) شکل ریاضی این مدل را نشان می‌دهد.

$$E(t) = \frac{1}{\tau_1 - \tau_s} \times \left[\left(\frac{t - \tau_{pf}}{\tau_s} \right) - \left(\frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_s} \right) e^{\frac{t - \tau_{pf}}{\tau_s}} + \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_s} e^{\frac{t - \tau_{pf}}{\tau_1}} \right] \quad (6)$$

(۱) Breakage function determination software

(۲) Numerical grinding optimization tools in C

که از معادله‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$R_s = \frac{\sum R_i m_i}{\sum m_i} \quad (14)$$

که در آن مقدار جامد خوراک در طبقه اندازه i ام است. ملاحظه می‌شود که معادله‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) به هم مرتبط بوده و فرایند محاسبه آنها تکراری است که در شبیه‌سازی با در نظر گرفتن یک مقدار اولیه برای یکی از مقادیر و ایجاد یک حلقه تکرار مناسب، مقادیرهای R_i و R_f و بر اساس ملاکی برای توقف الگوریتم تکرار محاسبه می‌شوند. در شبیه‌سازی، مدل پلیت برای پیش بینی دانه بندی جریان‌های ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون و آهنگ جریان آنها بر اساس هندسه هیدروسیکلون و آهنگ جریان خوراک ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل ناگسوارارائو

این مدل در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط ناگسوارارائو ارائه شد [۹]. در این مدل متغیرهای وابسته شامل موردهای زیر هستند:

$$EU = Q \left/ \left(D_c \sqrt{\frac{P}{\rho_p}} \right) \right. \quad (1)$$

- عدد اولر^(۱)، $d_{\delta.c}/D_c$ - حد جدایش بدون بعد،

- بازیابی آب در ته ریز، R_f

- بازیابی حجمی دوغاب ورودی در ته ریز، R_v

در مدل ناگسوارارائو متغیرها و ضریب‌های مستقل به کار رفته، بر اساس مشاهدات پدیده شناختی است. یک بسط اصلاح شده مناسب از عددهای اولر و فروید^(۲) به عنوان یک عامل قابل توجه در محاسبه نیروی گریز از مرکز تولید شده در هیدروسیکلون مورد استفاده قرار گرفت. عامل ته‌نشینی با مانع نیز برای احتساب تأثیر حرکت دیفرانسیلی ذره‌های جامد و در نهایت تأثیر در حد جدایش تصحیح شده مد نظر قرار گرفت.

در این مدل متغیرهای طراحی مناسب برای استفاده در معادله‌ها شامل موردهای زیر است:

- قطر داخلی هیدروسیکلون، D_c

- اندازه سرریز کاهش یافته، D_o/D_c

- اندازه ته ریز کاهش یافته، D_u/D_c

- اندازه دهانه ورودی کاهش یافته، D_f/D_c

- طول قسمت استوانه ای هیدروسیکلون کاهش یافته، L_c/D_c

- زاویه قسمت مخروطی هیدروسیکلون، θ

$$d_{\delta.c} = F_1 \frac{39 \sqrt{D_c} D_i^{0.6} D_o^{0.1} \eta^{0.5} \exp(0.63 C_V^P)}{D_u^{0.1} h^{0.38} Q^{0.45} \left[\frac{P_s - 1}{1.6} \right]^k} \quad (8)$$

$$m = F_2 \sqrt[0.94]{\left(\frac{D_c h}{Q} \right)^{0.15}} \exp\left(\frac{-1.58 S}{1+S} \right) \quad (9)$$

$$P = F_3 \frac{1.88 Q^{0.18} \exp(0.055 C_V^P)}{D_c^{0.27} D_i^{0.94} h^{0.28} (D_u^2 + D_o^2)^{0.87}} \quad (10)$$

$$S = \quad (11)$$

$$F_4 \frac{1.8 \sqrt[0.23]{\rho_p} (D_u/D_o)^{0.21} h^{0.54} (D_u^2 + D_o^2)^{0.36} \exp(0.054 C_V^P)}{D_c^{0.11} P^{0.23}}$$

در این معادله‌ها D_u ، D_o ، D_i ، D_c و h به ترتیب قطر داخلی هیدروسیکلون در پایین لوله (جمع کننده) گرداب، قطر داخلی ورودی، قطر داخلی سرریز، قطر داخلی ته ریز و ارتفاع آزاد هیدروسیکلون است که همه آنها بر حسب سانتی‌متر در رابطه به کار می‌روند. همچنین C_V^P درصد حجمی جامد بار ورودی، Q آهنگ جریان حجمی ورودی بر حسب لیتر بر دقیقه و ρ_i ، ρ_s به ترتیب معادل چگالی ذره‌های جامد و مایع بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است. پارامترهای مدل نیز شامل $d_{\delta.c}$ (حد جدایش تصحیح شده به میکرون)، m (تیزی (دقت) جدایش)، P (افت فشار بر حسب کیلوپاسکال) و S (تقسیم جریان که نسبت آهنگ جریان حجمی ته ریز به سر ریز را نشان می‌دهد) است. از آنجایی که فلینتاف و همکارانش در معادله‌های خود بار اولیه را دخالت ندادند، به جای آن از ضریب‌های F_1 تا F_4 برای کالیبره کردن مدل استفاده کردند.

با توجه به موارد قبل، برای کاربرد در تجزیه و تحلیل فرایند و شبیه‌سازی، پلیت رابطه (۱۲) را ارائه کرد [۹]:

$$R_i = R_f + (1 - R_f) \left[1 - \exp\left(-0.693 (x_i / d_{\delta.c})^m \right) \right] \quad (12)$$

که در آن، R_f ، معادل بازیابی مایع به ته ریز هیدروسیکلون و x_i اندازه ذره مشخصه برای طبقه اندازه i ام است. بازیابی مایع به ته‌ریز هیدروسیکلون با استفاده از معادله‌ی (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$R_f = \frac{S}{(1+S)} - \frac{R_s C_V^P}{100} \quad (13)$$

$$1 - \frac{C_V^P}{100}$$

R_s بازیابی قسمت جامد خوراک به ته ریز هیدروسیکلون است

(۱) Euler

(۲) Froude

بر اساس پیشنهاد/ستینور^(۱) این ضریب متناسب با نسبت حجمی ذره‌های جامد موجود در دوغاب است [۹]. بر این اساس معادله‌ی (۲۰) برای محاسبه این ضریب ارائه شد:

$$\lambda = C_V / (1 - C_V)^2 \quad (20)$$

در این معادله C_V ، نسبت حجمی ذره‌های جامد موجود در بار اولیه ورودی به هیدروسیکلون است. همانند مدل پلیت، ناگسوارارائو نیز برای محاسبه میزان تقسیم ذره‌ها به دو بخش سر ریز و ته ریز در هیدروسیکلون معادله‌هایی را ارائه کرد. بر این اساس معادله‌ی اولیه او به صورت معادله‌ی (۲۱) بود [۹]:

$$E_{Oa_i} = C \left[\frac{e^\alpha - 1}{e^{\alpha d_i / d_{\delta,c}} + e^\alpha - 2} \right] \quad (21)$$

در این معادله C ، نسبت وزنی آب ورودی به سر ریز و یا به عبارت دیگر برابر $(1 - R_f)$ است. d_i نیز همانند مدل پلیت اندازه‌ی ذره مشخصه برای طبقه اندازه i ام است. α ، ضریب شکل منحنی کارایی هیدروسیکلون است که باید برای هر کانه به طور جداگانه تعیین شود. بنابراین، معادله‌ی مقدار E_{Oa_i} مقدار ذرات جامد راه یافته به سر ریز در هر طبقه سرندی است.

برای بهتر مشخص شدن ضریب شکل منحنی کارایی هیدروسیکلون، فعالیت‌های گسترده‌ای انجام شد که مهم‌ترین آنها مربوط به وایتین^(۲)، فینچ^(۳) و همکارانش است که بر اساس مطالعات آنها ضریب دیگری به نام ضریب قلاب ماهی^(۴)، β ، در رابطه بالا وارد شد. بر این اساس رابطه ۲۲ ارائه شد: [۹]

$$E_{Oa_i} = C \left[\frac{(1 + \beta d_i / d_{\delta,c})(e^\alpha - 1)}{e^{\alpha d_i / d_{\delta,c}} + e^\alpha - 2} \right] \quad (22)$$

با در دست داشتن مقدارهای متناسب با ضریب‌های شکل منحنی کارایی هیدروسیکلون و معادله‌ی بالا مقدار ذره‌های جامد و آب راه یافته به هر طبقه سرندی قابل محاسبه است.

تصدیق^(۵) و ارزیابی^(۶) شبیه ساز

دو مفهوم تصدیق و ارزیابی (V&V) از مفاهیم اساسی شبیه‌سازی هستند. تصدیق یعنی استفاده درست از معادله‌ها و پرهیز از خطاهای محاسباتی و ارزیابی یعنی کنترل و مقایسه‌ی

در صورتی که شکل دهانه ورودی به صورت دایره ای نباشد سطح دایره ای برابر با سطح مقطع موجود را در نظر می‌گیرند. متغیرهای عملیاتی دیگر مانند نوع جریان ورودی یا آشفتگی جریان قابل صرف نظر کردن هستند. در پایان، معادله‌هایی که توسط ناگسوارارائو برای محاسبه پارامترهای مدل خود ارائه کرد شامل موردی زیر هستند: [۹]

$$\frac{Q}{D_c^2 \sqrt{P/\rho_p}} = K_{Q_0} \{D_c^{-1/10}\} \times \quad (16)$$

$$\left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1/68} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-1/45} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{-1/20} \theta^{-1/10}$$

$$\frac{d_{\delta,c}}{D_c} = K_{D_0} \{D_c^{-1/65}\} \times \quad (17)$$

$$\left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1/52} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{-1/50} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-1/50} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{-1/20} \theta^{-1/15} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-1/22} \lambda^{1/93}$$

$$R_f = K_{W_0} \{D_c^{-1/10}\} \times \quad (18)$$

$$\left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1/93} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{-1/40} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-1/50} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{-1/22} \theta^{-1/24} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-1/52} \lambda^{1/27}$$

$$R_v = K_{V_0} \{D_c^{-1/10}\} \times \quad (19)$$

$$\left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1/84} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{-1/82} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-1/75} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{-1/22} \theta^{-1/24} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-1/23}$$

در این معادله‌ها ضریب‌های K_{Q_0} ، K_{D_0} ، K_{W_0} و K_{V_0} ضریب‌های کالیبره شدن هستند که هر کدام متناسب با معادله خود، در نظر گرفته می‌شوند. θ زاویه قسمت مخروطی شکل هیدروسیکلون (بر حسب درجه)، Q دبی حجمی دوغاب ورودی (بر حسب m^3/h)، P فشار بار اولیه در محل ورودی به هیدروسیکلون (بر حسب کیلوپاسکال)، g شتاب جاذبه زمین (بر حسب m/s^2)، ρ_p چگالی پالپ ورودی (بر حسب t/m^3) هستند. مقدارهای حد جدایش تصحیح شده بر حسب میکرون و R_v ، R_f نیز بر حسب نسبت (بدون بعد) حاصل خواهند شد.

برای در نظر گرفتن تأثیر الگوی جریان درهم در هیدروسیکلون، به‌ویژه با توجه به درصد ذره‌های جامد بالای موجود در فعالیت‌های صنعتی، و به دنبال آن تأثیر در مسیر حرکت ذره‌ها، ضریب ته نشینی با مانع، λ ، در معادله‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

(۱) Steinour

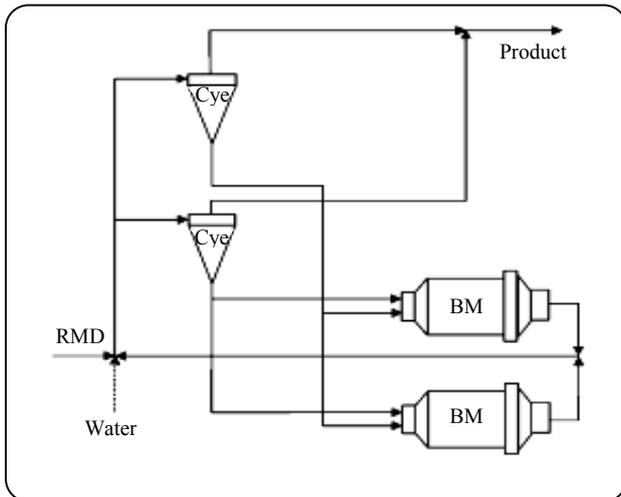
(۲) Whiten

(۳) Finch

(۴) Fish hook

(۵) Verification

(۶) Validation



شکل ۱- فلوشیت مدار آسیای گلوله ای و هیدروسیکلون مجتمع لوپین کانادا.

- این شبیه ساز نسبت به شبیه ساز MODSIM، نیز دارای برتری‌هایی است، از جمله این که در شبیه سازی هیدروسیکلون در MODSIM تنها از مدل پلیت استفاده شده است در حالی در این شبیه ساز افزونه بر مدل پلیت، از مدل ناگسواراژو نیز می توان استفاده کرد.

نتیجه‌ها و بحث

شبیه سازهای حالت پایدار ابزار مناسب و پیشرفته‌ای برای طراحی، تحلیل و بهینه سازی مدارهای فراوری مواد معدنی هستند. در حال حاضر تعداد محدودی شبیه ساز فراوری به صورت تجاری وجود دارند. از جمله این شبیه سازها می توان به JKSImMet [۱۲]، USIMPACT [۱۳] و MODSIM [۱۴] اشاره کرد که تحت محیط های DOS و Windows اجرا می شوند.

هر یک از این نرم افزارها دارای دستورالعمل های ویژه ای برای نصب، ورود اطلاعات و اجرا هستند که خود نیاز به آموزش دارد. در شبیه ساز COMSIM از محیط اکسل برای شبیه سازی مدارهای آسیا استفاده شده که این امر خود باعث تسهیل در ورود اطلاعات و اجرا شده است. با مقایسه مقادیر واقعی با مقادیرهای پیش بینی شده به وسیله شبیه ساز COMSIM، درستی و دقت آن قابل توجه است.

تاریخ دریافت: ۱۴/۱۱/۸۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۲۹/۱۱/۸۶

نتیجه های شبیه ساز با داده های واقعی. در شبیه ساز COMSIM این دو مفهوم با اجراهای بسیار شبیه ساز و مقایسه نتیجه های آن با داده های واقعی و نتیجه های شبیه سازهای دیگر، تا حد قابل اطمینانی کنترل شده است. نمونه این مقایسه که مربوط به مدار آسیای گلوله ای و هیدروسیکلون مجتمع معدنی لوپین کانادا می باشد (شکل ۱) در جدول های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در جدول ۱، دانه بندی محصول آسیای گلوله ای مجتمع معدنی لوپین کانادا با مقادیرهای پیش بینی شده به وسیله دو شبیه ساز COMSIM و BMCS و در جدول ۲ دانه بندی سرریز و ته ریز هیدروسیکلون همان مجتمع به صورت مشابه آورده شده است. افزون بر این، برای مقایسه بهتر مقادیرهای موجود در دو جدول به صورت نموداری در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. ملاحظه می شود که نمودارها بر یکدیگر منطبق هستند.

برای مدارهای بسته که دارای بار بازگشتی هستند، شبیه ساز تا هنگامی که به حالت تعادل برسد ادامه می یابد و به محض رسیدن به این حالت، توزیع اندازه همه جریان ها از جمله جریان بازگشتی و میزان بار در گردش را مشخص می کند. شرط برقراری تعادل برابری آهنگ سرریز و آهنگ بار اولیه ورودی و همچنین پایداری بار بازگشتی است.

کاربرد شبیه ساز

شبیه ساز COMSIM دارای نتیجه های قابل قبولی برای طراحی و بهینه سازی مدارهای آسیاست. افزون بر این این شبیه ساز دارای توانایی های دیگری نیز است که در زیر به مهم ترین آنها اشاره می شود:

- مهم ترین توانایی شبیه ساز COMSIM، تغییر شرایط اولیه و به دنبال آن مشاهده تغییرهای حاصل در نتیجه و محصول است که می تواند کاربر را در یافتن بهترین شرایط عملیاتی کمک کند و به طور کلی این شبیه ساز می تواند در مطالعه های بهینه سازی مدارهای خردایش به کار گرفته شود.

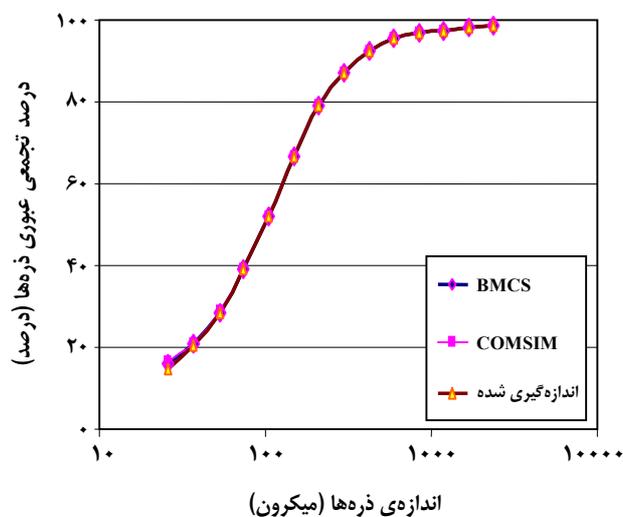
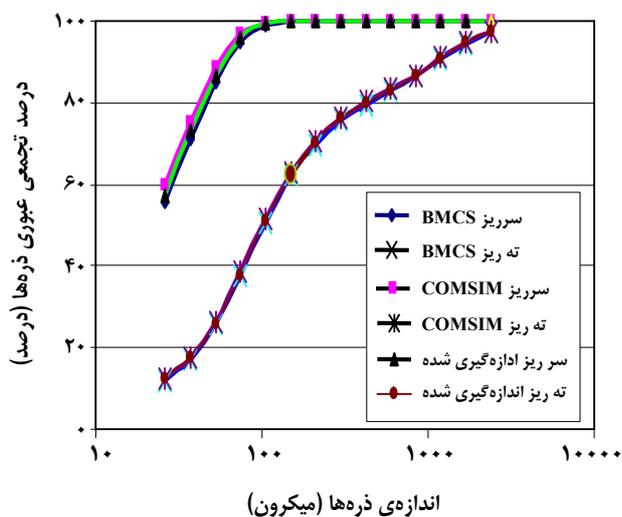
- با توجه به محیط اکسل تغییر شرایط بسیار ساده و در دسترس است، به ویژه در مقایسه با شبیه سازهایی که تحت محیط DOS اجرا می شوند، مانند BMCS، این قابلیت بیشتر به چشم می خورد و همچنین این شبیه ساز قادر است به راحتی داده های ورودی و خروجی برنامه را به صورت تصویری نشان دهد که در مقایسه با برنامه BMCS می تواند در تعبیر و تفسیر داده های ورودی و نتیجه های شبیه سازی کمک فراوانی را در اختیار کاربر قرار دهد (شکل ۴).

جدول ۱- مقایسه‌ی نتیجه‌های پیش‌بینی محصول آسیای مجتمع لوپین کانادا با مقادارهای واقعی.

طبقه بندی محصول آسیا				
ردیف	اندازه چشمه سرند (میکرون)	اندازه گیری شده	پیش بینی COMSIM	پیش‌بینی BMCS
۱	۲۳۸۰	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴۸
۲	۱۶۸۳	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۴
۳	۱۱۹۰	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳
۴	۸۴۱	۰/۸	۰/۸	۰/۸
۵	۵۹۵	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱
۶	۴۲۱	۲/۸۷	۲/۸۷	۲/۸۷
۷	۲۹۸	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷
۸	۲۱۰	۸/۲۶	۸/۲۵	۸/۲۶
۹	۱۴۹	۱۲/۵۴	۱۲/۵۳	۱۲/۵۴
۱۰	۱۰۵	۱۴/۴۷	۱۴/۴۶	۱۴/۴۷
۱۱	۷۴	۱۳/۱۳	۱۳/۱۰	۱۳/۱۳
۱۲	۵۳	۱۰/۳۲	۱۰/۲۸	۱۰/۳۲
۱۳	۳۷	۷/۹۲	۷/۶۰	۷/۶۷
۱۴	۲۶	۵/۹۶	۴/۷۱	۴/۷۹
۱۵	۰	۱۴/۷	۱۶/۳۵	۱۶/۱۲

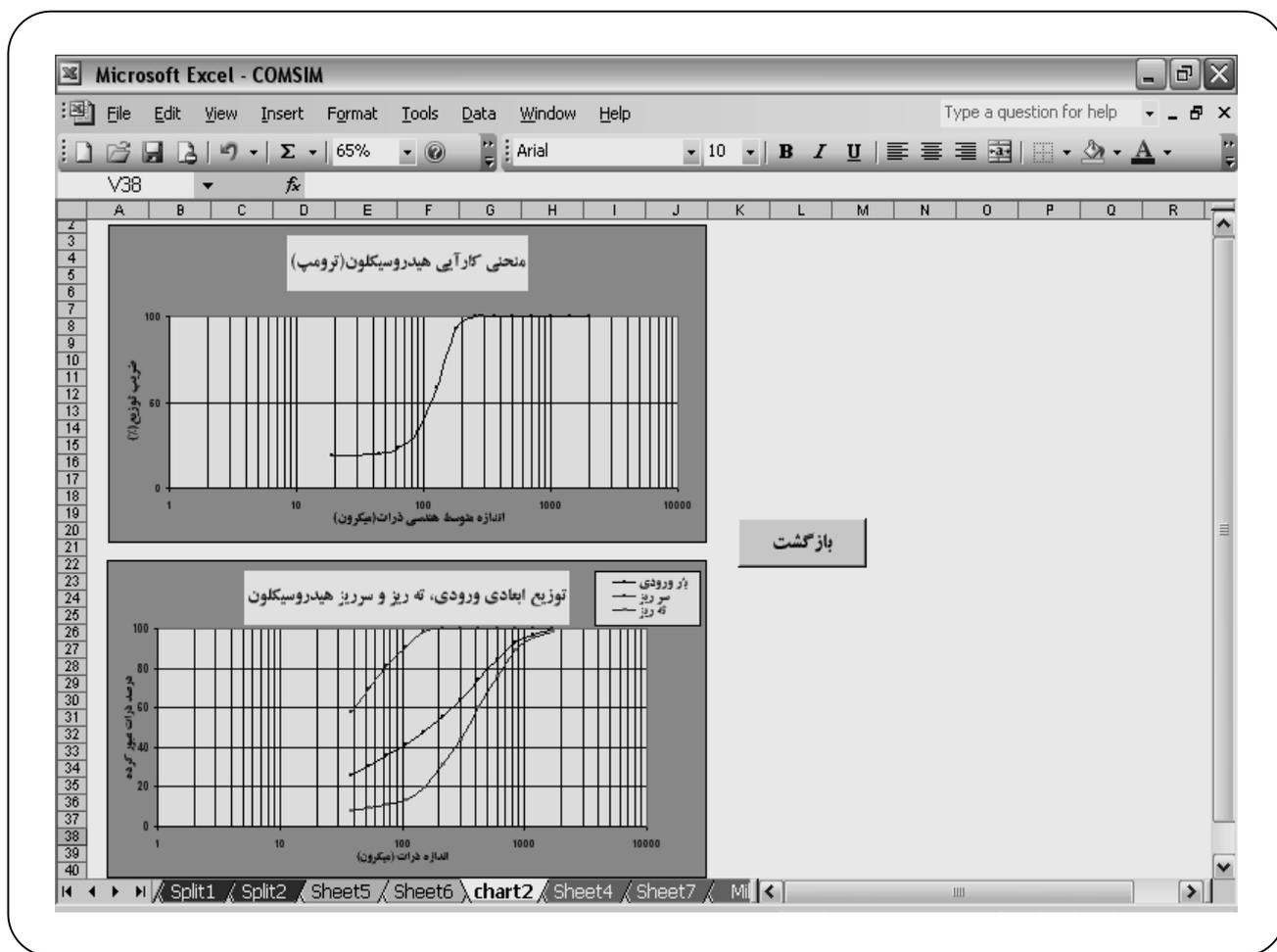
جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی سرریز و ته ریز هیدروسیکلون مجتمع لوپین کانادا با مقادارهای واقعی.

طبقه بندی سرریز و ته ریز هیدروسیکلون							
ردیف	اندازه چشمه سرند (میکرون)	سرریز			ته ریز		
		اندازه گیری شده	پیش بینی COMSIM	پیش‌بینی BMCS	اندازه گیری شده	پیش بینی COMSIM	
۱	۲۳۸۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۵۰	۲/۶۰	
۲	۱۶۸۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۸۵	۲/۸۹	
۳	۱۱۹۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۶۹	۳/۷۷	
۴	۸۴۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴/۳۰	۴/۳۵	
۵	۵۹۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۴۸	۳/۵۳	
۶	۴۲۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۲۰	۳/۲۵	
۷	۲۹۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۸۸	۳/۹۵	
۸	۲۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۵/۹۲	۵/۹۶	
۹	۱۴۹	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۹	۷/۶۸	۷/۵۲	
۱۰	۱۰۵	۰/۶۷	۰/۴۷	۰/۹۵	۱۱/۵۱	۱۱/۶۵	
۱۱	۷۴	۳/۶۵	۲/۸۲	۴/۲۱	۱۳/۱۲	۱۳/۱۵	
۱۲	۵۳	۹/۰۱	۸/۰۹	۹/۸۷	۱۱/۹۱	۱۱/۸۰	
۱۳	۳۷	۱۳/۵۶	۱۳/۱۲	۱۳/۷۸	۸/۳۶	۸/۳۲	
۱۴	۲۶	۱۵/۶۲	۱۵/۷۲	۱۵/۳۸	۵/۳۸	۵/۲۶	
۱۵	۰	۵۷/۴۳	۵۹/۷۷	۵۵/۷۲	۱۲/۲۲	۱۱/۷۳	



شکل ۳- مقایسه‌ی نتیجه‌های شبیه‌سازی و مقادیرهای اندازه‌گیری شده توزیع ابعادی سرریز و ته ریز هیدروسیکلون مجتمع لوپین کانادا.

شکل ۲- مقایسه‌ی نتیجه‌های شبیه‌سازی و مقادیرهای اندازه‌گیری شده توزیع ابعادی محصول آسیای مجتمع لوپین کانادا.



شکل ۴- صفحه‌ی نمایش نمودارهای کارایی و توزیع اندازه‌ی جریان‌های هیدروسیکلون.

مراجع

- [1] Herbst, J., Rajamani, R.K., Mular, A. and Flintoff, B., Mineral Processing Plant/Circuit Simulators: An Overview, in: "Mineral Processing Plant Design, Practice and Control", Vol. 1 A. L. Mular et al., pp.383-403, SME-AIME, New York (2002).
- [۲] رضویان، سیدمحمد؛ شبیه‌سازی حالت پایدار مدارهای آسیاکردن در صفحه‌گسترده‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (۱۳۸۴).
- [3] Luckie, P.T., Austin, L.G., A Review Introduction to the Solution of the Grinding Equations by Digital Computation, *Minerals Sci. Eng.*, 4 (2), p. 24 (1972).
- [۴] یوسفی، علی اصغر؛ توسعه نرم افزاری برای تعیین توابع شکست مواد معدنی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، (۱۳۸۱).
- [5] Farzanegan, A., Laplante, A.R. and Lowther, D.A, A Knowledge-Based System for An Off-Line Optimization of Ball Milling Circuits, Proceedings of 29th CMP Conference, Ottawa, pp. 165-185, (1997).
- [6] Weller, K.R., Hold-Up and Residence Time Characteristics of Full Scale Grinding Circuits, 3rd Symp. of IM3P of IFAC, Montreal, Aug., pp. 303-309, (1980).
- [7] Plitt, L.R., A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier, *CIM Bulletin*, 69 (776), 114-123, (1976).
- [8] Flintoff, B.C., Plitt, L.R., Turak, A., Cyclone Modelling: A Review of Present Technology, *CIM Bulletin*, 80 (905), 39-50, (1987).
- [9] Nageswararao, K. and et al., Two Empirical Hydrocyclone Models Revisited, *Mineral Engineering*, 17, p. 671 (2004).
- [10] Napier-Munn, T.J. and Lynch, A.J., The Modelling and Computer Simulation of Mineral Treatment Processes-Current Status and Future Trends, *Minerals Engineering*, 5 (2), p. 143 (1992).
- [۱۱] ایران‌نژاد، مهدی؛ فرزندگان، اکبر؛ رضویان، سیدمحمد؛ شبیه‌سازی حالت پایدار هیدروسیکلون در صفحه‌گسترده Excel، مجموعه مقالات کنفرانس مهندسی معدن، جلد سوم، ص ۸۲۱ - ۸۱۱ (۱۳۸۳).
- [12] Irannajad, M., Farzanegan, A. and Razavian, S.M., Computer Simulation of Tumbling Ball Mills in Excel Spreadsheet, Proceeding of 20th World Mining Congress, Tehran, Iran, pp. 763-769, (2005).
- [13] Durance, M.V., Villeneuve, J., Fourniguet, G. and Brochot, S., Computer Simulation of Mineral and Hydrometallurgical Processes, USIM PAC 2, A Single Software from Design to Optimization, Proc. of Intl. Symp. on Modelling, Simulation and Control of Hydrometallurgical Processes, Papangelakis, V.G. and Demopoulos, G.P., (Ed.), Montreal, pp. 109-121, (1993).

- [14] King, R.P., "Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems", Butterworth-Heinemann, (2001).
- [15] Farzanegan, A., Knowledge-Based Optimization of Mineral Grinding Circuits, PhD Thesis, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, (1998).