شبیه‌سازی کامپیوتری مدارهای خردایش کلینکر کارخانه سیمان اردبیل

اکبر فرزانگان*+، ابراهیم قاسمی اردی
تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی معدن، صندوق پستی ۴۵۶۳ ـ ۱۱۱۵۵

علی‌رضا ولیان
کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه معدن

وحید حسن‌زاده
تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی معدن، صندوق پستی ۴۵۶۳ ـ ۱۱۱۵۵

چکیده: کاربرد آسیاهای لوله‌ای چنداطاقکی در مدار بسته با یک جدا کننده هوایی تجربه‌ای بسیار معمول برای خردایش کلینکر در کارخانه‌های سیمان است. کارخانه سیمان اردبیل که فراورده‌ی آن سیمان پوزولانی می‌باشد نیز از چنین مدارهایی برای خردایش مخلوط کلینکر، پوزولان و گچ با درصدهای معین، برای تولید سیمان استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی مدارهای آسیاکنی سیمان این کارخانه نمونه‌های بسیاری از جریان‌های موجود در مدارها برداشته شد. همچنین از داخل آسیاها از نقطه‌هایی با فاصله‌های ثابت روی محور آسیاها نمونه‌برداری شد. سپس دانه‌بندی نمونه‌ها با استفاده از تجزیه سرندی و پراش‌سنجی لیزری به دست آمد و به همراه شدت جریان‌های گوناگون موازنه جرم شدند. اندیس کار باند و تابع شکست نمونه‌ی بار ورودی به آسیا (مخلوط کلینکر، پوزولان و گچ) در آزمایشگاه تعیین شد. از این داده‌ها برای واسنجی مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی استفاده شد. برای شبیه‌سازی مدارها از نرم‌افزار Bsed Modular Comminution Simulator (BMCS) استفاده شد که می‌تواند مدارهای گوناگون خردایش را شبیه‌سازی کند. در این مقاله، مدل‌های ریاضی آسیای گلوله‌ای و منحنی جدایش برای شبیه‌سازی آسیاهای لوله‌ای و مدل منحنی جدایش برای شبیه‌سازی شبکه‌های میانی وجداکننده هوایی به کار گرفته شدند. برنامه BMCS در شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای از مدل موازنه جمعیت برای توصیف ریاضی فرایند شکست و مدل مخازن به دنبال هم برای توصیف ریاضی توزیع زمان اقامت و در شبیه‌سازی شبکه‌های میانی و جداکننده هوایی از مدل وایتن برای توصیف ریاضی منحنی جدایش استفاده می‌کند. پارامترهای مدل وایتن نیز با استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار MATLAB تعیین شد. همخوانی نزدیک نتیجه‌های شبیه‌سازی و داده‌های واقعی نشان دهنده دقت نمونه‌برداری، اعتبار مدل‌های مورد استفاده و واسنجی آنها و صحت پیش‌بینی‌ها توسط شبیه‌ساز است.

واژه‌های کلیدی: آسیای لوله‌ای، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، کارخانه سیمان اردبیل، BMCS، مدل وایتن.

KEY WORDS: *Cement grinding, Modeling and simulation, Ardabil cement plant, BMCS, Whiten model.*

*عهده دار مکاتبات
+E-mail: farzanegan@ut.ac.ir

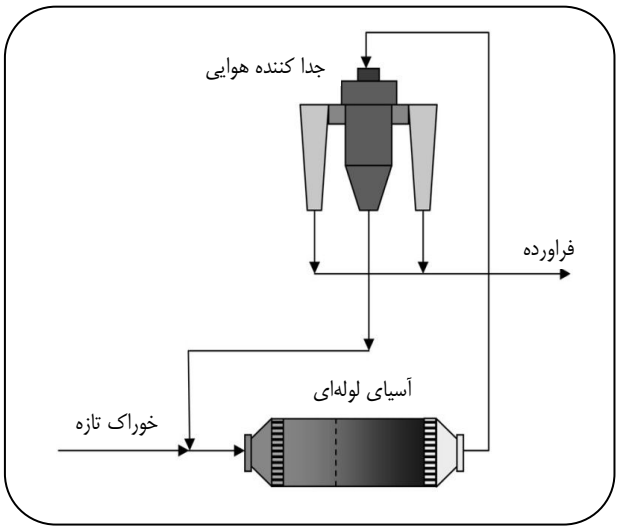
مقدمه

صنعت سیمان یکی از مصرف کننده‌های عمده انرژی در جهان است؛ به طوری که حدود ۲ درصد از کل انرژی مصرفی جهان در کارخانه‌های سیمان مصرف می‌شود. در کارخانه‌های سیمان ۶۰ درصد از این مقدار انرژی، صرف آسیا کردن مواد می‌شود [۱]. مصرف انرژی فراوان برای آسیا کردن سیمان، مهندسان فرایند را ناگزیر به انجام مطالعه‌های بهینه‌سازی این مدارها می‌کند. تعداد زیاد پارامترهای عملیاتی مؤثر در کارآیی مدارهای خردایش و پیچیدگی روابط میان آنها باعث شده است که شبیه‌سازی به ابزاری ضروری و قدرتمند برای بهینه‌سازی عملکرد آنها تبدیل شود. تاکنون گزارشی از پژوهش در مورد شبیه‌سازی مدارهای خردایش در کارخانه‌های تولید سیمان کشور منتشر نشده است و به نظر می‌رسد فعالیت چشمگیری در این زمینه انجام نشده است. پژوهش‌های گذشته در این رابطه بیشتر معطوف به آشنایی با مفاهیم نظری شبیه‌سازی مدارهای خردایش کلینکر سیمان و توسعه نرم‌افزارهای مورد نیاز محدود بوده است [۳، ۲]. بنابراین شبیه‌سازی مدارهای آسیای سیمان کارخانه سیمان اردبیل که با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز مدارهای خردایش BMCS[۱] انجام می‌شود می‌تواند برای بهینه‌سازی فرایند تولید با آزمودن شرایط عملیاتی گوناگون برای رسیدن به یک هدف مشخص مورد استفاده قرار گیرد.

کارخانه سیمان اردبیل دارای دو مدار خردایش همانند با نام‌های Z۱ و Z۲ است. همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، هر یک از این مدارها شامل یک «آسیای گلوله‌ای لوله‌ای دو اطاقکی» در مدار بسته با یک جدا کننده هوایی است. دو خانه آسیا با یک شبکه میانی از هم تفکیک می‌شوند و یک شبکه تخلیه هم در انتهای آسیا قرار دارد. سامانه انتقال مواد در آسیا جاروب هواست. ویژگی‌های آسیای Z۱ و Z۲ در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ـ ویژگی‌های آسیاهای لوله‌ای در مدارهای مورد مطالعه.

	اطاقک اول		طول شبکه‌میانی (m)	اطاقک دوم		سرعت گردش آسیا (rpm)
	طول (m)	قطرداخلی (m)		طول (m)	قطر داخلی (m)	
Z۱	۳٫۷۵	۳٫۷۲	۰٫۹۲	۸٫۳۳	۳٫۹	۱۵٫۶
Z۲	۴٫۲۵	۳٫۷۲	۰٫۹۲	۷٫۸۳	۳٫۹	۱۵٫۶



شکل ۱ـ مدار ساده شده آسیای سیمان کارخانه سیمان اردبیل.

آشنایی با BMCS

BMCS نام اختصاری بازگشتی برای بسته نرم‌افزاری Based Modular Comminution Simulator (BMCS) است. در این عبارت، BMCS خود حروف اختصاری است و به برنامه Ball Milling Circuits Simulator اشاره می‌کند که هسته اولیه نسخه‌های جدید BMCS محسوب می‌شود [۴].

نامگذاری اولیه به این دلیل بوده است که نخستین نسخه BMCS به منظور شبیه‌سازی مدارهای آسیای گلوله‌ای توسعه یافت. پس از نسخه اولیه برنامه، به تدریج پودمان‌های دیگر برای شبیه‌سازی دستگاه‌های خردایشی دیگر که در فرآوری مواد معدنی کاربرد دارند، توسعه یافتند و به ساختار شبیه‌ساز اضافه شدند. واحدهایی که نسخه پنجم BMCS قادر به شبیه‌سازی آنهاست عبارتند از: (۱) آسیای گلوله‌ای (۲) آسیای میله‌ای (۳) غلتک‌های آسیاکنی فشار بالا (۴) سرند چند طبقه صنعتی (۵) هیدروسیکلون (۶) جداکننده هوایی بر اساس منحنی جدایش (۷) نقطه تقسیم یک جریان به چند جریان (۸) نقطه ترکیب چند جریان و تشکیل یک جریان و (۹) آزمون همگرایی در مدارهای بسته خردایش. نرم‌افزار BMCS قادر است حالت یکنواخت هر مدار دلخواه که ترکیبی از واحدهای بالا باشد را شبیه‌سازی کند.

شکل ۲ نشان دهنده نمودار جریان نرم‌افزار BMCS است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، این نرم‌افزار

(۱) Based Modular Comminution Simulator (BMCS)

ساختار دنباله‌ای دارد و بنابراین واحدهای موجود در مدار، یکی پس از دیگری بر اساس ماتریس ارتباط مدار توسط نرم‌افزار پردازش می‌شوند. شبیه‌سازی مدارهایی که بدون بار در گردش هستند، با یک مرتبه پیمایش مسیر محاسباتی به پایان می‌رسد؛ اما در مورد مدارهایی که بار در گردش دارند، پردازش دنباله‌ای واحدها تا رسیدن به حالت یکنواخت به صورت تکراری ادامه می‌یابد.

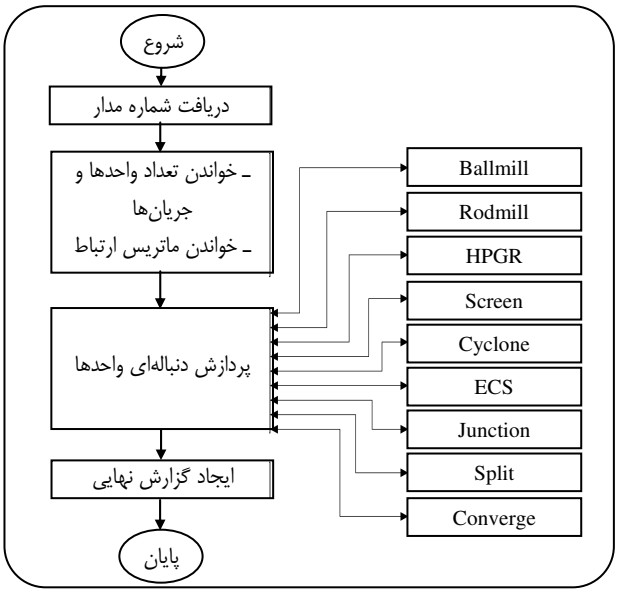
مدل‌سازی مدار

برای شبیه‌سازی یک آسیای لوله‌ای در مدار باز از یک سامانه مجازی متشکل از چند آسیای گلوله‌ای و یک طبقه‌بندی کننده استفاده می‌شود [۵]. می‌توان آسیای لوله‌ای را به صورت یک سامانه مجازی متشکل از یک یا دو آسیای گلوله‌ای ساده به صورت متوالی، یک آسیای گلوله‌ای در مدار بسته با یک طبقه‌بندی کننده و یک آسیای گلوله‌ای در انتها فرض کرد (شکل ۳). اساس این فرض این است که شبکه میانی اجازه عبور ذره‌های درشت را نمی‌دهد و آنها را برای خردایش بیشتر در قسمت انتهایی اطاقک نگه می‌دارد. بنابراین قسمت انتهایی اطاقک اول مانند یک مدار بسته آسیای گلوله‌ای عمل می‌کند. شبکه انتهایی آسیا اثر چشمگیری ندارد و نیازی به شبیه‌سازی آن نیست. این موضوع در مطالعه موردی انجام شده در این پژوهش نیز همان‌گونه که در شکل ۵ می‌آید مشخص است و دلیل آن این است که در انتهای آسیای لوله‌ای، ذره‌ها آن‌قدر ریز شده‌اند که همگی به راحتی از شبکه انتهایی عبور می‌کنند.

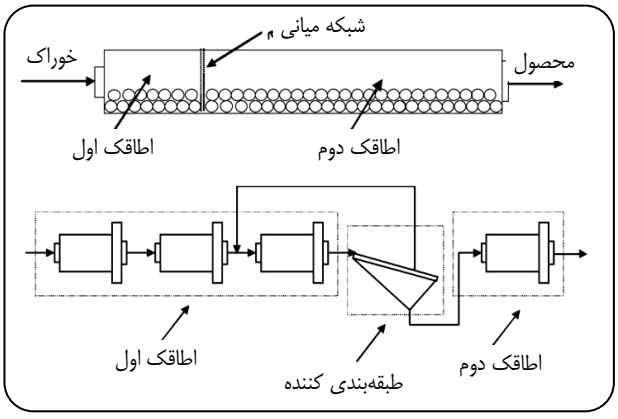
رویکرد پیش‌گفته در مورد شبیه‌سازی «آسیاهای گلوله‌ای لوله‌ای» به طور موفقیت آمیزی برای شبیه‌سازی مدارهای آسیاکنی کلینکر در تعدادی از کارخانه‌های سیمان در ترکیه به کار رفته است [۹ـ ۵]. در پژوهش‌های انجام گرفته در کشور ترکیه، برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدارهای بسته خردایش کلینکر شامل غلتک‌های آسیاکنی فشار بالا، آسیاهای گلوله‌ای لوله‌ای و جداکننده‌های هوایی از نرم‌افزار JKSimMet استفاده شده است.

مدلی که BMCS توسط آن یک آسیای گلوله‌ای پیوسته را شبیه‌سازی می‌کند، یک مدل موازنه جمعیت است که در آن مدل ولر[۱] به عنوان الگوی توزیع زمان اقامت فرض شده است. معادله ریاضی این مدل به صورت معادله (۱) نوشته می‌شود.

$$m_d = T(I+S\tau_s)^{-2}(I+S\tau_l)^{-1}\exp(-S\tau_{pf})T^{-1}m_f \qquad (۱)$$



شکل ۲ـ نمودار عملیات BMCS.



شکل ۳ـ رویکرد مدل‌سازی آسیای لوله‌ای دو اطاقکی آسیای واقعی در بالا و مدل مجازی در پایین

m_d: بردار توزیع اندازه ذره‌های فراورده (درصد باقیمانده)

T: ماتریس تبدیل که در معادله $T^{-1}[B-I]ST=-S$ صدق کند

B: ماتریس پایین مثلثی تابع شکست

I: ماتریس همانی

S: ماتریس قطری تابع انتخاب

τ_s: زمان اقامت میانگین مخلوط کننده کامل کوچک در مدل ولر

τ_l: زمان اقامت میانگین مخلوط کننده کامل بزرگ در مدل ولر

τ_{pf}: زمان اقامت واحد جریان قالبی در مدل ولر

m_f: بردار توزیع اندازه ذره خوراک (درصد باقیمانده)

(۱) Weller

برای شبیه‌سازی طبقه‌بندی کننده نشان داده شده در شکل ۳ از مدل وایتن[۱] استفاده می‌شود که اساس آن بر منحنی کارآیی جدایش طبقه‌بندی کننده‌ها استوار است. معادله‌ی وایتن به صورت معادله (۲) نوشته می‌شود [۱۰، ۵، ۳ـ۱].

$$E_{oA} = C\left[\frac{(1+\beta.\beta^{*}.x)(\exp(\alpha)-1)}{\exp(\alpha.\beta^{*}.x)+\exp(\alpha)-2}\right] \quad (۲)$$

که در آن:

E_{oA}: کسری از خوراک که به جریان ریزدانه راه می‌یابد.

C: کسری از مواد که تحت اثر طبقه‌بندی واقعی قرار می‌گیرد.

β: پارامتر قلاب ماهی مربوط به منحنی کارآیی نرمال شده

β*: پارامتر کمکی برای تعیین d_{50c}

α: پارامتر تیزی جدایش

x: نسبت d/d_{50c}

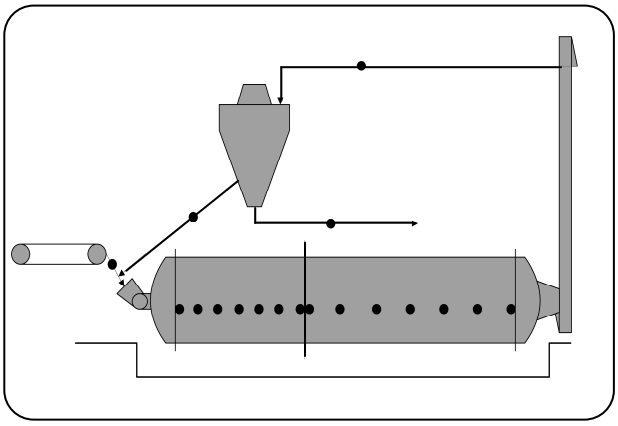
d: اندازه متوسط ذره‌ها

d_{50c}: حد جدایش تصحیح شده

در پژوهش‌های به عمل آمده توسط *لینچ* و *همکاران* [۱۱] و مؤسسه JKMRC[۲] استرالیا اعتبار معادله وایتن برای شبیه‌سازی جدا کننده‌های هوایی بررسی و مورد پذیرش قرار گرفته است. بنابراین برای شبیه‌سازی مدار بسته آسیای سیمان، مدل وایتن بار دیگر برای مدل‌سازی جدا کننده هوایی به کار می‌رود.

نمونه‌گیری، موازنه جرم و واسنجی

برای واسنجی مدل‌ها برای دو مدار آسیای سیمان موجود در کارخانه سیمان اردبیل، پس از اطمینان از پایداری مدارها، نمونه‌برداری جامعی از جریان‌های موجود در هر مدار انجام شد. نمونه‌ها از داخل آسیا در محل‌های گوناگون و با فاصله‌های منظم در هر اطاقک و همچنین از جریان‌های گوناگون ورودی و خروجی آسیا و جداکننده هوایی جمع‌آوری شدند. محل‌های نمونه‌برداری در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. برخی از نمونه‌های استخراج شده مورد آزمایش پراش‌سنجی لیزر و دیگر نمونه‌ها مورد تجزیه سرندی قرار گرفتند و توزیع اندازه ذره جریان‌ها به‌دست آمد. همزمان با نمونه‌گیری، شدت جریان‌ها از اطاق کنترل ثبت شد. این عملیات برای هر مدار دو بار با فاصله زمانی چند روزه تکرار شد و دو مجموعه داده برای هر مدار به دست آمد. مقدار شدت جریان ورودی به مدارها در زمان نمونه‌برداری اول



شکل ۳ـ رویکرد مدل‌سازی آسیای لوله‌ای دو اطاقکی آسیای واقعی در بالا و مدل مجازی در پایین

با نمونه‌برداری دوم متفاوت بوده و در نتیجه نمونه‌برداری‌ها در دو شرایط عملیاتی متفاوت انجام شده‌اند.

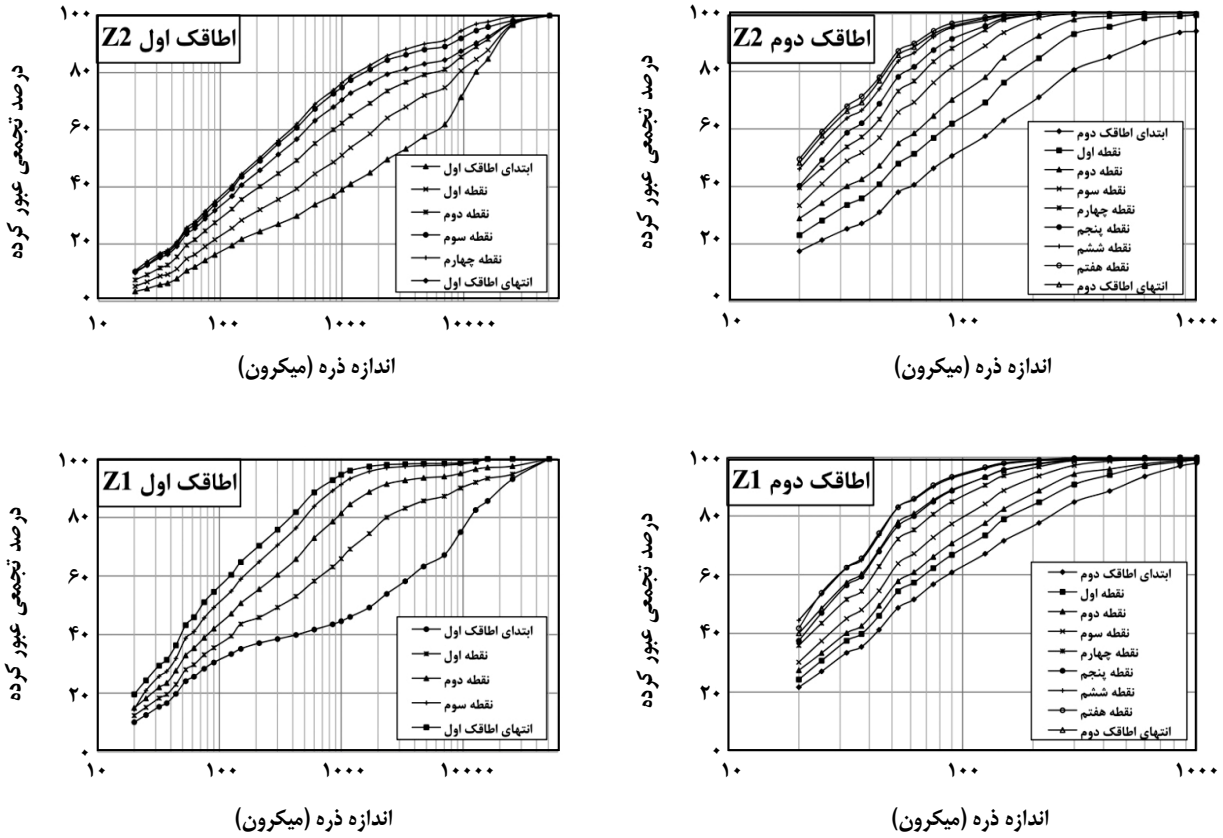
از اولین مجموعه برای تخمین پارامترهای مدل‌های گوناگون و از دیگری برای اعتبارسنجی استفاده شد. مجموع این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار NorBal[۳] موازنه جرم شد. انجام موازنه جرم سبب افزایش کیفیت داده‌ها و افزایش دقت واسنجی مدل‌ها می‌شود. برای واسنجی مدل‌های موجود در سامانه مجازی اشاره شده، نیاز به نمونه‌گیری از داخل آسیا برای تعیین پارامترهای قابل قبول برای شبیه‌سازی مدار می‌باشد. برای این منظور، مدار به یکباره به حالت توقف کامل درآمد. در این حالت، همزمان با توقف گردش آسیا، جریان‌های مواد و گردش هوا نیز قطع شد. پس از توقف مدارها، عملیات نمونه‌گیری از داخل آسیاها، روی محور طولی آنها و در فاصله‌های مساوی انجام شد. در داخل اطاقک اول آسیای Z۱ از شش نقطه، در اطاقک اول آسیای Z۲ از پنج نقطه و در اطاقک دوم هر دو آسیا از نه نقطه با فاصله‌های مساوی نمونه برداری شد. روند تغییرهای توزیع اندازه ذره در طول هر دو آسیای Z۱ و Z۲ در اطاقک اول و دوم در شکل ۵ نمایش داده شده است.

در مرحله بعد، یک نمونه معرف از خوراک ورودی به مدار (مخلوط کلینکر، پوزولان و گچ)، در آزمایشگاه مورد آزمایش اندیس کار و تابع شکست قرار گرفت. اندیس کار ماده مورد آزمایش ۱۲٫۲ kWh/st به دست آمد. همچنین بر روی این نمونه، آزمایش‌های مربوط به تابع شکست انجام شد. با استفاده از

(۱) Whiten

(۲) Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre

(۳) Noranda Balace



شکل ۵ـ تغییرهای توزیع اندازه ذره‌ها در طول آسیاها.

داده‌های به دست آمده از این آزمایش‌ها و با کمک گرفتن از نرم‌افزار BFDS[1] [۱۲]، مقدار تابع شکست برای ۲۲ طبقه اندازه که معرف بازه کامل توزیع اندازه ذره می‌باشند، محاسبه شد. با داشتن تابع شکست مواد و با استفاده از داده‌های نمونه‌گیری از داخل آسیا، واسنجی مدل‌های آسیای گلوله‌ای مجازی انجام شد. این کار شامل تخمین تابع انتخاب هر آسیای مجازی با استفاده از محاسبات برگشتی است. تخمین توابع انتخاب با استفاده از نرم‌افزار NGOTC[2] [۴] صورت گرفت. الگوریتم تخمین تابع انتخاب بر اساس جستجوی دو بخشی در یک بازه معین به ترتیب برای طبقه اندازه ذره اول تا طبقه اندازه ذره آخر می‌باشد. مقدار تابع انتخاب برای یک طبقه اندازه ذره معین، مقداری است که در تکرار پایانی الگوریتم جستجو به ازای آن مقدار مدل موازنه جمعیتی فرآیند آسیاکنی برای آن طبقه اندازه ذره مقدار جرم فراورده‌ی خرد شده را با تقریب لازم محاسبه می‌کند. شایان گفتن است که در تمامی مرحله‌های واسنجی و شبیه‌سازی، مقدار پارامترهای توزیع زمان اقامت برابر با مقدارهای پیش‌فرض ($\tau_{pf} = \tau_s = ۰.۱$ و $\tau_l = ۰.۷$) در نظر گرفته شد. این مقدارهای پیش‌فرض، بیانگر یک نمودار نوعی از مدل توزیع زمان اقامت ولر در آسیاهای گلوله‌ای می‌باشد که می‌توان آن را یک حالت میانه دانست.

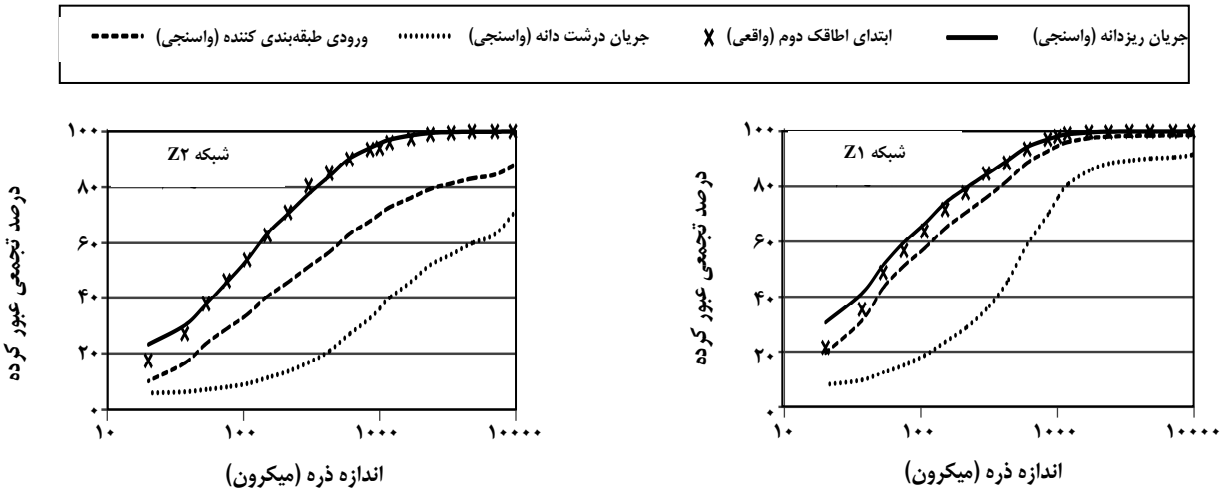
استفاده دیگری که از داده‌های به دست آمده از نمونه‌گیری از داخل آسیا شد، تخمین پارامترهای مدل وایتن برای طبقه‌بندی کننده موجود در سامانه مجازی یا همان شبکه در آسیای واقعی بود. در واقع، واسنجی مدل ریاضی این طبقه‌بندی کننده باید با توجه به مدار بسته‌ای که در آن قرار دارد انجام شود. برای این هدف باید آنقدر پارامترهای مدار بسته را تغییر داد تا خروجی آن کمترین اختلاف را با دانه‌بندی اولین نقطه در اطاقک دوم داشته باشد. این جستجوی ریاضیاتی با برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک این نرم‌افزار انجام شد. در شکل ۶ نتیجه‌های این واسنجی برای آسیاهای Z۱ و Z۲ نشان داده شده است.

(۱) Brakage Function Determination Software

(۲) Numerical Grinding Optimization Tools in C

جدول ۲ـ پارامترهای مدل وایتن برای طبقه‌بندی کننده‌های مجازی و جداکننده‌های هوایی.

مدار	واحد	C	α	β	β*	d_{50c} (μm)
Z۱	طبقه‌بندی کننده مجازی	۱۰۰	۰٫۰۹۹	۰٫۰۰۳	۰٫۹۸۹	۸۴۳
	جدا کننده هوایی	۰٫۷۸۳	۱٫۰۹۳	۰٫۰۰	۰٫۶۰۸	۵۳
Z۲	طبقه بندی کننده مجازی	۱۰۰	۰٫۳۶۶	۰٫۰۰	۱۰۰	۵۸۴
	جدا کننده هوایی	۰٫۹۲۴	۳٫۰۷۴	۰٫۰۰	۰٫۹۲۲	۹۷



شکل ۶ ـ مقایسه دانه‌بندی شبیه‌سازی شده و واقعی در مرحله واسنجی طبقه‌بندی کننده.

دیده می‌شود که در هر دو مورد جریان ریزدانه طبقه‌بندی کننده به خوبی بر داده‌های واقعی مربوط به ابتدای اطاقک دوم منطبق می‌شود. پارامترهای تخمین زده شده رابطه وایتن مربوط به این طبقه‌بندی کننده در جدول ۲ آمده است. واسنجی رابطه وایتن باید برای جدا کننده هوایی نیز انجام شود که در مقایسه با واسنجی قبلی بسیار آسان‌تر است؛ چرا که جریان‌های اطراف جدا کننده هوایی در واقعیت وجود دارند و از آنها نمونه‌گیری شده است. این واسنجی هم با استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار MATLAB انجام شد و نتیجه‌های آن در جدول ۲ نمایش داده شده است.

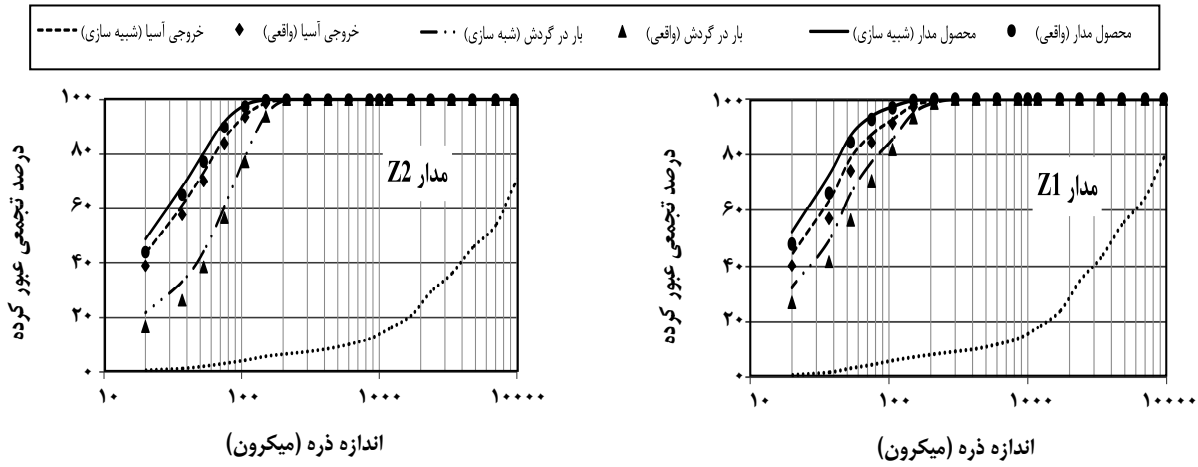
اعتبارسنجی شبیه‌سازی

اعتبارسنجی یک شبیه‌ساز با مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده مدارهای آسیاکنی توسط آن شبیه‌ساز با عملکرد واقعی مدارهای آسیاکنی که بر اساس نمونه‌برداری‌ها اندازه‌گیری شده است انجام می‌گیرد. هر چه مقدارهای شبیه‌سازی شده به مقدارهای واقعی اندازه‌گیری شده نزدیکتر باشد اعتبار شبیه‌ساز بیشتر خواهد بود.

برای شبیه‌سازی مدارهای مورد نظر با BMCS ابتدا لازم است که مدار مجازی توصیف شده در قسمت ۳ (تصویر پایین در شکل ۳) برای نرم‌افزار تعریف شود. برنامه BMCS شمای عملیات یک مدار معین را با خواندن «ماتریس ارتباط» تشخیص می‌دهد. این ماتریس برای مدار مجازی تشکیل و سپس به پرونده متنی ذخیره ماتریس‌های ارتباط اضافه شد. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، از مجموعه دوم داده‌ها برای اعتبارسنجی استفاده شد. از مجموعه دوم داده‌ها، توزیع اندازه ذره و شدت جریان خوراک ورودی به مدار همراه با پارامترهای واسنجی به BMCS وارد شد. سپس پیش‌بینی‌های محاسبه شده در شبیه‌سازی با داده‌های واقعی به دست آمده از نمونه‌برداری‌ها و اندازه‌گیری‌های این مجموعه داده‌ها مقایسه شدند. برای هر دو مدار Z۱ و Z۲ مقایسه دانه‌بندی‌ها و شدت جریان‌های شبیه‌سازی شده و واقعی به ترتیب در شکل ۷ و جدول ۳ نشان داده است.

جدول ۳ـ مقایسه شدت جریان‌های شبیه‌سازی شده و واقعی.

	نام جریان	واقعی (t/h)	شبیه‌سازی (t/h)
Z۱	خوراک تازه	۹۲،۰	–
	خروجی آسیا	۱۴۶،۸۷	۱۵۱،۷۵۷
	بار در گردش	۵۴،۸۷	۵۹،۷۹۸
	فراورده مدار	۹۲،۰	۹۱،۹۴۳
Z۲	خوراک تازه	۹۵،۰	–
	خروجی آسیا	۱۱۶،۸۲	۱۱۸،۶۲۱
	بار در گردش	۲۱،۸۲	۲۳،۶۲۳
	فراورده مدار	۹۵،۰	۹۴،۹۹۸



شکل ۷ ـ مقایسه دانه‌بندی‌های شبیه‌سازی شده و واقعی.

نتیجه‌گیری

از مقایسه دانه‌بندی‌های شبیه‌سازی شده و واقعی (شکل ۷) دیده شد که بیشینه تفاوت میان این دو مقدار برای جریان‌های خروجی آسیا، بار در گردش و فراورده مدار همگی در بازه قابل قبول قرار دارند. همچنین دیده شد که بیشینه خطای شبیه‌سازی در پیش‌بینی شدت جریان‌ها در شبیه‌سازی مدارهای Z۱ و Z۲ به ترتیب برابر با ۸،۹۸٪ و ۸،۲۶٪ است (جدول ۳).

بر این اساس، عملیات شبیه‌سازی موفق و دقیق ارزیابی می‌شود که نشان دهنده دقت نمونه‌برداری، اعتبار رویکرد مدل‌سازی، درستی واسنجی و صحت محاسبه‌های نرم‌افزار BMCS و سایر نرم‌افزارهای استفاده شده است.

همان‌گونه که پیش از این گفته شد، شبیه‌سازی ابزاری قدرتمند و دقیق برای اهداف بهینه‌سازی است. با شبیه‌سازی موفقیت‌آمیز مدارهای آسیای سیمان کارخانه سیمان اردبیل، راه برای اجرای مطالعه‌های بهینه‌سازی بر روی این مدارها گشوده شده است.

اکنون می‌توان با تغییر پارامترهای عملیاتی در شبیه‌ساز، کیفیت و نرخ فراورده را در شرایط گوناگون پیش‌بینی کرد. با استفاده از این توانایی می‌توان با آزمون و خطا، شرایط عملیاتی بهینه را انتخاب و در مدار واقعی اجرا نمود. همچنین می‌توان این جستجو برای حالت بهینه را به طور سیستماتیک با استفاده از یک روش جستجوی ریاضیاتی مانند الگوریتم ژنتیک انجام داد.

قدردانی

نویسندگان مقاله وظیفه خود می‌دانند از همکاری مدیران و کارکنان محترم کارخانه سیمان اردبیل به ویژه آقای مهندس اعظمی مدیر عامل محترم شرکت سیمان اردبیل و آهک آذرشهر، آقای مهندس گرانمایه مدیر کارخانه، آقای مهندس فرهادی مدیر کنترل کیفی و آقای مهندس مکبر مدیر تولید صمیمانه تشکر و قدردانی به عمل آورند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۱۶

مراجع

[1] Özer C.E., Ergün S.L.A., Benzer H., Modeling of the Classification Behavior of the Diaphragms Used in Multi-Chamber Cement Mills, *International Journal of Mineral Processing,* **80**(1), p. 58 (2006).

[۲] فرزانگان، اکبر؛ مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی کامپیوتری آسیاهای لوله‌ای چندخانه‌ای، گزارش طرح پژوهشی، دانشگاه کاشان (۱۳۸۳).

[3] Farzanegan A., Valian A., Simulation of Cement Grinding Circuits by BMCS, Proc. of International Mining Congress, October, 18-21, Tehran, Iran (2010).

[4] Farzanegan A., "Knowledge-Based Optimization of Mineral Grinding Circuits", Ph.D. Thesis, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal, Canada (1998).

[5] Benzer H., Ergun L., Öner M., Lynch A.J., Simulation of Open Circuit Clinker Grinding, *Minerals Engineering*, **14**(7), p. 701 (2001).

[6] Genç Ö., Benzer A.H., Horizontal Roller Mill (Horomill) Application Versus Hybrid HPGR/Ball Milling in Finish Grinding of Cement, *Minerals Engineering*, **22**(15), p. 1344 (2009)

[7] Dundar H., Benzer H., Aydoğan N.A., Altun O, Toprak A.N., Ozcan A., Eksi D., Sargın A., Simulation Assisted Capacity Improvement of Cement Grinding Circuit: Case Study, Cement Plant, *Minerals Engineering*, **24**(3-4), p. 205 (2011).

[8] Aydoğan N.A., Benzer H., Comparison of the Overall Circuit Performance in the Cement Industry: High Compression Milling vs. Ball Milling Technology. *Minerals Engineering*, **24**(3-4), p. 211 (2011).

[9] Altun O., Benzer H., Dundar H., Aydoğan N.A., Comparison of Open and Closed Circuit HPGR Application on Dry Grinding Circuit Performance, *Minerals Engineering*, **24**(3-4), p. 267 (2011).

[10] Napier-Munn T.J., Morrell S., Morrison R.D., Kojovic T., "Mineral Comminution Circuits; Their Operation and Optimisation", JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, No. 2, Jullius Kruttschnitt Mineral Research Center, Australia (1996).

[11] Lynch A.J., Öner M., Benzer H., Simulation of a Closed Cement Grinding Circuits, *ZKG International,* **10**, p. 560 (2000).

[۱۲] یوسفی، علی‌اصغر؛ فرزانگان، اکبر؛ ایران‌نژاد، مهدی؛ معرفی نرم‌افزار BFDS برای تعیین تابع شکست مواد معدنی؛ مجموعه مقالات سومین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۱).