

## اعتبار سنجی مدل‌های آسیا و هیدرو سیکلون در مدار آسیای گلوله ای سه چاهون با استفاده از شبیه ساز MODSIM

لیلا پرنده<sup>۱</sup>؛ علی دهقانی<sup>۲</sup>؛ مهدی خسروی راد<sup>۳</sup>، محمد نوع پرست<sup>۴</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، گروه پژوهشی معدن، دانشگاه یزد [l.parand@yahoo.com](mailto:l.parand@yahoo.com)  
۲- دانشیار فرآوری مواد معدنی؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ گروه پژوهشی معدن، دانشگاه یزد [a.dehghani@yazd.ac.ir](mailto:a.dehghani@yazd.ac.ir)  
۳- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق، کارشناس ارشد مرکز تحقیقات مهندسی وابسته به دانشگاه یزد [mehdikhosrav@gmail.com](mailto:mehdikhosrav@gmail.com)  
۴- استاد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران [mnoaparast@yahoo.com](mailto:mnoaparast@yahoo.com)

(دریافت ۱۱ مرداد ۱۳۹۳، پذیرش ۲۷ بهمن ۱۳۹۴)

### چکیده

در این تحقیق شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون، با استفاده از نتایج آزمایش‌های خردایش روی نمونه خوراک و مدل‌های نرم‌افزار MODSIM، انجام شده و نتایج حاصل با داده‌های صنعتی مقایسه گردیده است. ابتدا، مدار با مدل‌های مختلف موجود در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد و نتایج آن با داده‌های حاصل از نمونه‌برداری از مدار مقایسه گردید و نشان داده شد که مدل‌های GMSU برای آسیای گلوله‌ای و Cyca برای هیدروسیکلون دارای کمترین خطا در پیش بینی توزیع ابعادی محصول است. با استفاده از این دو مدل، تاثیر پارامترهای عملیاتی شامل ابعاد گلوله، درجه انباشتگی، درصد جامد و دبی خوراک ورودی، بر عملکرد مدار آسیا بررسی گردید. مشاهده شد که با کاهش قطر گلوله‌ها تا ۲۵ میلی‌متر و افزایش میزان خوراک تازه تا ۳۰۰ تن بر ساعت، امکان دستیابی به محصولی با دانه‌بندی مناسب (۹۲ میکرون) وجود دارد. پارامترهای درصد جامد و دبی خوراک ورودی به آسیا، در مقیاس صنعتی نیز تغییر داده شدند و تاثیر آنها بر ابعاد محصول مدار فعلی، ارزیابی شد. در این حالت، خطای شبیه‌سازی در تخمین توزیع ابعادی سرریز هیدروسیکلون، برای تغییر درصد جامد و دبی خوراک، به ترتیب، ۲/۵ و ۲/۲ درصد محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی همچنین نشان داد که با تغییر محل هیدروسیکلون در مدار آسیای گلوله‌ای سه چاهون، نسبت خردایش آسیا از ۱/۸ به ۳/۳ قابل افزایش است. با این تغییر، میزان بار ورودی به آسیا نیز از ۳۴۲ به ۱۵۹ تن بر ساعت کاهش خواهد یافت، که موجب افزایش ظرفیت آسیا می‌شود. در این حالت ابعاد محصول نهائی مدار به ۸۵ میکرون خواهد رسید. تاثیر پارامترهای عملیاتی بر مدار آسیای پیشنهادی نیز به کمک این نرم افزار بررسی گردید. در این حالت نیز با انتخاب گلوله‌های با ابعاد ۲۵ میلیمتر، و با میزان خوراک تازه حدود ۳۰۰ تن در ساعت، ابعاد محصول نهائی مدار به ۹۶ میکرون خواهد رسید.

### کلمات کلیدی

شبیه سازی آسیای گلوله‌ای، مدل‌های آسیا و هیدروسیکلون، دبی خوراک، قطر گلوله، درصد جامد.

۱- مقدمه

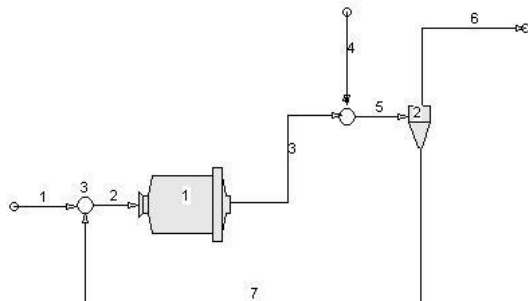
که در آن:  $S_i^E$  انرژی- تابع انتخاب برای ذرات موجود در طبقه  $i$  می باشد و معمولاً بر حسب تن بر کیلووات ساعت بیان می- شود.  $\zeta_1$  و  $\zeta_2$  پارامترهای مدل هستند.

در این تحقیق از شبیه سازی برای بررسی عملکرد مدار آسیای گلوله ای سه چاهون استفاده شده است. در اغلب تحقیقات انجام شده در شبیه سازی مدارهای خردایش با استفاده از نرم افزار MODSIM تنها یکی از چندین مدل موجود در نرم افزار برای شبیه سازی به کار گرفته شده است. برای مثال آقایان دکتر سام و جعفری در شبیه سازی محصول آسیای گلوله ای خط چهارم تولید کنسانتره (پلی کام) مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر با نرم افزار MODSIM از مدل MILL برای آسیا استفاده کردند.

ولی در این تحقیق، ابتدا مدار با استفاده از مدل های مختلف آسیا و هیدروسیکلون موجود در نرم افزار MODSIM، مدل- سازی شده است و از مدل هایی که دارای کمترین خطا بوده در مرحله بهینه سازی استفاده شده است. در انتها نتایج حاصل از شبیه سازی با داده های صنعتی مقایسه گردیده است.

۲- شبیه سازی مدار آسیای گلوله ای سه چاهون

آسیای گلوله ای سه چاهون از نوع تخلیه سرریز با قطر ۴/۵ متر و طول ۶/۹ متر می باشد. فلوشیت مدار آسیای گلوله ای خط سه چاهون در شکل ۱ نشان داده شده است. خوراک ورودی به این مدار، کنسانتره حاصل از جداکننده های مغناطیسی اولیه است که قبل از ورود به مرحله کلینر، به منظور آزاد سازی بیشتر کانی های آهن دار، در آسیای گلوله ای خرد می شوند. (شاخه ۴ باطله کلینر جداکننده های مغناطیسی مرحله دوم است، که با درصد جامد کمتر از ۱٪ به مخزن بعد از آسیای گلوله ای اضافه می شود).



شکل ۱: فلوشیت مدار آسیای گلوله ای سه چاهون

بررسی ها نشان داده است که نسبت خردایش مدار آسیا گلوله- ای خط تولید سه چاهون در کارخانه فرآوری چغارت حدود ۲/۶۰ است که کمتر از مقدار طراحی، ۵/۷۵، است. به طوری

از روش های شبیه سازی، به طور گسترده ای، جهت بهبود عملکرد مدارهای خردایش در کارخانه های فرآوری، استفاده شده است [۱]. در مدل سازی خردایش، سه پدیده، انتقال مواد در داخل آسیا (توزیع زمان ماند)، توزیع اندازه ذرات حاصل از شکست (تابع شکست<sup>۱</sup>) و سینتیک خردایش (تابع انتخاب<sup>۲</sup>) باید تعریف شوند [۲].

روابط ریاضی مختلفی برای مدل سازی تابع شکست و تابع انتخاب ارائه شده است. مشهورترین مدل های تجربی تابع شکست بر مبنای این ایده است که عمدتاً ذرات بر اساس دو مکانیزم شکاف برداشتن و ساییش خرد می شوند. هر کدام از این دو مکانیزم دارای توزیع تجمعی است که می تواند با رابطه (۱) مدل شود [۲]:

$$B(x; y) = \varphi \left(\frac{x}{y}\right)^\gamma + (1 - \varphi) \left(\frac{x}{y}\right)^\beta \quad (1)$$

که در آن:

$x$ ، توزیع ابعاد محصول،  $y$ ، ابعاد اولیه ذرات و  $\varphi$ ، نسبت بخش ریزدانه در کل محصول است.

"آستین" تغییرات نرخ ویژه شکست (تابع انتخاب) را بر اساس تغییر اندازه ذره، با تابع (۲) نشان داده است:

$$k(dp) = \frac{S_1 d_p^\alpha}{1 + \left(\frac{d_p}{u}\right)^\lambda} \quad (2)$$

که در آن:

$dp$ ، اندازه ذره بر حسب میلی متر و  $k(dp)$ ، نرخ شکست بر حسب  $(1/\text{min})$ ،  $S_1$  مقدار تابع انتخاب برای ذرات با اندازه ۱ میلی متر و  $\mu$ ،  $\lambda$  و  $\alpha$  پارامترهای مدل هستند [۲] و [۳].

مدل تابع انتخاب ارائه شده توسط "هربست و فورستنا" نرخ ویژه شکست مربوط به اندازه ی طبقه ی  $i$  را متناسب با انرژی ویژه ی خالص ورودی به شارژ آسیا، فرض می کند. به عبارت دیگر مقدار شکستی که در آسیا اتفاق می افتد، با میزان انرژی که به وسیله مواد درون آسیا جذب می شود، متناسب است. تغییرات انرژی-نرخ ویژه شکست با اندازه ذره با رابطه (۳) مدل می شود. [۲]:

$$\ln \left(\frac{S_i^E}{S_1^E}\right) = \zeta_1 \ln \left(\frac{d_{pi}}{d_{p1}}\right) + \zeta_2 \left[ \ln \left(\frac{d_{pi}}{d_{p1}}\right) \right]^2 \quad (3)$$

1 Breakage Function

2 Selection Function

جدول ۳: پارامترهای توزیع زمان ماند محاسبه شده برای آسیای گلوله‌ای سه چاهون

| مدل      | پارامترهای مدل |            |            |            | خطا % | زمان ماند متوسط |
|----------|----------------|------------|------------|------------|-------|-----------------|
|          | k              | Tpf        | Ts         | Tl         |       |                 |
| Weller   | ۵۷/۱۱          | ۳/۵۰ دقیقه | ۲/۲۶ دقیقه | ۴/۳۷ دقیقه | ۱۵    | ۱۲/۳۸ دقیقه     |
|          | K              | Tpf        | T          | N          |       |                 |
| N-mixers | ۵۶/۱۳          | ۲/۹۷ دقیقه | ۹/۰۰ دقیقه | ۳          | ۱۵    | ۱۱/۹۸ دقیقه     |
|          |                |            |            |            |       |                 |

جدول ۴: ضرایب کالیبراسیون محاسبه شده‌ی مدل‌های "پلیت" و "ناگسوارانو" برای هیدروسیکلون سه چاهون

| مدل ها         | پارامترهای مدل  |                 |                 |                 |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                | k <sub>1</sub>  | k <sub>2</sub>  | k <sub>3</sub>  | k <sub>4</sub>  |
| مدل پلیت       | ۱/۱۵            | ۲/۷۰            | ۱/۴۰            | ۰/۶۰            |
| مدل ناگسوارانو | K <sub>Q0</sub> | K <sub>Do</sub> | K <sub>wo</sub> | K <sub>vo</sub> |
|                | ۱۷۲/۲           | ۰/۰۰۰۲۷         | ۲۳/۸۴           | ۳/۴۶            |

به منظو اعتبارسنجی مدل‌های مختلف، خروجی آسیای گلوله‌ای به کمک نرم افزار MODSIM و با مدل‌های موجود در این نرم افزار شبیه‌سازی شد. شکل ۲ توزیع ابعادی خروجی آسیای گلوله‌ای سه چاهون در شبیه‌سازی با مدل‌های آسیای HFSU و GMSU (جدول ۵)، در مقایسه با داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. داده‌های تجربی با استفاده از نرم افزار Bilmat موازنه شد و داده‌های موازنه شده برای محاسبه خطا مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. میزان خطای هر یک از مدل‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$e = \frac{\sqrt{\sum (x_i - x'_i)^2}}{\sum x_i} \quad (4)$$

که در آن x و x'، درصد مواد در فراکسیون ابعادی n، به ترتیب، در داده‌های تجربی و شبیه‌سازی است. جدول ۵ مشخصات مدل‌های آسیای گلوله‌ای در نرم‌افزار MODSIM و خطای نسبی هر یک از مدل‌ها در پیش‌بینی توزیع ابعاد خروجی آسیای سه چاهون را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود تمام مدل‌ها توانسته‌اند، خروجی آسیا را به خوبی پیش‌بینی نمایند. ولی از بین مدل‌های موجود مدل GMSU دارای کمترین خطای نسبی (۰/۶۸۲٪) بوده است.

که d<sub>80</sub> محصول نهایی مدار بسته آسیا حدود ۱۱۶ میکرون و بزرگتر از میزان طراحی (۸۰ میکرون) است [۴]. افزایش ابعاد محصول مدار آسیا باعث کاهش عیار و بازیابی در مدار جدایش می‌گردد.

به منظور شبیه‌سازی مدار فوق، آزمایش‌های خردایش بر روی نمونه معرف خوراک ورودی به مدار آسیا انجام شد و تابع شکست و تابع انتخاب محاسبه گردید [۵] و [۶]. سپس با استفاده از روابط (۱)، (۲) و (۳)، به ترتیب، پارامترهای مدل تجربی تابع شکست، مدل تابع انتخاب "آستین" و مدل تابع انتخاب "هریست و فورستنا" مطابق جداول ۱ و ۲ محاسبه شدند.

جدول ۱: پارامترهای مدل تجربی تابع شکست، محاسبه شده برای

خوراک مدار آسیای گلوله‌ای سه چاهون

|                |       |
|----------------|-------|
| β              | ۴/۹۱  |
| γ              | ۰/۹۱  |
| δ              | -۰/۱۲ |
| Φ <sub>5</sub> | ۰/۹۱  |

جدول ۲: پارامترهای تابع انتخاب محاسبه شده برای خوراک مدار آسیای گلوله‌ای سه چاهون

| مدل ها           | پارامترهای مدل              |                |                |      |
|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------|
|                  | S <sub>1</sub>              | A              | μ              | ^    |
| آستین            | ۰/۹۸ (بر دقیقه)             | ۱/۱۴           | ۱/۰۱۶ میکرون   | ۲/۰۱ |
| هریست و فیورستنا | S <sub>1</sub> <sup>E</sup> | ζ <sub>1</sub> | ζ <sub>2</sub> |      |
|                  | ۰/۳۳ kWh/t                  | - ۱/۱۱۲        | - ۰/۷۱۰        |      |

پارامترهای توزیع زمان ماند برای مدل "ولر" و مدل n مخلوط کننده کامل، با اضافه کردن نمک طعام به ورودی آسیا و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی پالپ در بازه‌های زمانی مختلف، به کمک نرم افزار RTDWEN محاسبه شد [۷] که نتایج آن در جدول ۳ منعکس شده است.

در ادامه با نمونه‌گیری از خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون و اندازه‌گیری توزیع ابعادی و رقت نمونه‌ها، ضرایب مدل‌های هیدروسیکلون "پلیت" و "ناگسوارانو" محاسبه شدند (جدول ۴) [۸] و [۹].

توزیع ابعادی بار ورودی و سرریز هیدروسیکلون که در مرحله کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفته است در جدول پیوست ۱ آمده است.

چند مدل‌های دیگر نیز دارای خطای کمی هستند.

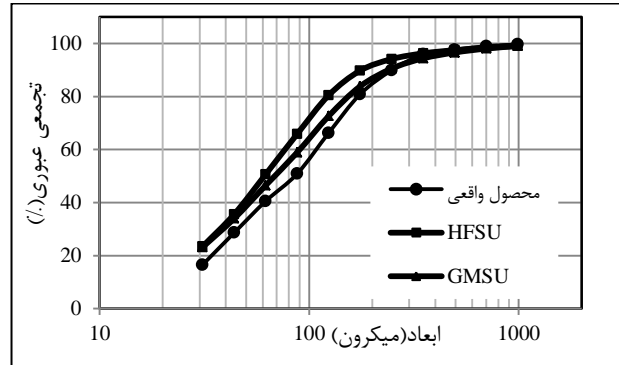
جدول ۶: مدل‌های مختلف هیدروسیکلون در نرم‌افزار MODSIM و خطای نسبی هریک، در شبیه‌سازی هیدروسیکلون سه‌چاهون

| مدل  | نوع تابع طبقه بندی               | ضرایب کالیبراسیون | خطا % |       |
|------|----------------------------------|-------------------|-------|-------|
|      |                                  |                   | سرریز | تهریز |
| Cycl | Rosin-Rammler                    | مدل پلیت          | ۷,۳۲  | ۷,۳۷  |
| Cyca | Rosin-Rammler & Exponentia l sum | -                 | ۸,۱۱  | ۷,۷۵  |
| Nage | Exponentia l sum                 | مدل ناگسوارثو     | ۶,۹۶  | ۷,۶۶  |

بر اساس نتایج فوق، در شبیه‌سازی مدار بسته آسیای گلوله‌ای، از مدل GMSU برای آسیا و مدل Cyca برای هیدروسیکلون استفاده شد. داده‌های مورد نیاز در مدل GMSU، پارامترهای تابع شکست (جدول ۱)، پارامترهای آزمایشگاهی تابع انتخاب (جدول ۲)، توزیع زمان ماند نسبی مواد در آسیا (جدول ۳)، ابعاد آسیاهای آزمایشگاهی و صنعتی و نیز توزیع شارژ گلوله در آسیای صنعتی می‌باشند. در این مدل پارامترهای تابع انتخاب آستین توسط نرم افزار بزرگ مقیاس می‌شوند. اختلاط مواد در آسیا با استفاده از سه ناحیه مخلوط کامل به صورت سری مدل می‌شود. دقت مدل‌های مختلف برای هیدروسیکلون تقریباً یکسان بود ولی به دلیل محدودیت عملیاتی از مدل Cyca استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی کارخانه مشخص می‌شود که شبیه‌سازی با نرم افزار MODSIM، با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی عملکرد مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون می‌باشد. بنابراین می‌توان با تغییر پارامترهای مختلف به کمک شبیه‌سازی با این نرم افزار، عملکرد مدار را پیش‌بینی کرد و بهترین شرایط را برای تولید محصولی مناسب تعیین نمود.

### ۳- تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد مدار آسیا

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر عملکرد مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون، مهمترین پارامترهای عملیاتی شامل: قطر گلوله، درجه انباشتگی آسیا، درصد جامد و تناژ خوراک تازه انتخاب شدند. برای هر پارامتر چند سطح در نظر گرفته شد و مدار به کمک نرم‌افزار MODSIM در شرایط مختلف، شبیه



شکل ۲: مقایسه خروجی شبیه‌سازی شده آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون با مدل‌های HFSU و GMSU در نرم‌افزار MODSIM با داده‌های تجربی

جدول ۵: مقایسه خطای نسبی در شبیه‌سازی خروجی آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون با مدل‌های مختلف آسیای گلوله‌ای در نرم‌افزار MODSIM

| خطا % | داده‌های مورد نیاز نرم افزار  | مدل توزیع زمان ماند | مدل تابع انتخاب          | نام مدل |
|-------|---|---------------------|--------------------------|---------|
| ۸,۷۷  | پارامترهای بزرگ مقیاس شده تابع انتخاب   | یک ناحیه مخلوط کامل | آستین                    | MILL    |
| ۹,۲۹  | محاسبه انرژی مورد نیاز آسیا   | یک ناحیه مخلوط کامل | هریست و فورسونا          | HFMI    |
| ۱۲,۲۸ | *محاسبه انرژی مورد نیاز توسط نرم افزار  | یک ناحیه مخلوط کامل | هریست و فورسونا          | HFSU    |
| ۹,۳۶  | پارامترهای بزرگ مقیاس شده تابع انتخاب   | سه ناحیه مخلوط کامل | آستین                    | GMIL    |
| ۶,۸۲  | پارامترهای بزرگ مقیاس شده تابع انتخاب با استفاده از داده‌های آسیای آزمایشگاهی | سه ناحیه مخلوط کامل | آستین با بزرگ مقیاس کردن | GMSU    |

اعتبار سنجی مدل‌های هیدروسیکلون بر اساس توزیع ابعادی سرریز و تهریز آن، نیز انجام شد که داده‌های آن در جدول ۶ آمده است. ملاحظه می‌شود که مدل Nage بهترین دقت را در پیش‌بینی دانه‌بندی سرریز و تهریز هیدروسیکلون دارد. هر

جدول ۷: سطوح پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی آسیا و ابعاد محصول مدار

| سطوح پارامترهای مطالعه شده و $d_{80}$ سرریز هیدروسیکلون شبیه سازی شده، $\mu m$ |         |         |         | پارامترها         |
|--|---------|---------|---------|-------------------|
| ۵۰   | ۴۲*     | ۳۰      | ۲۵      | ابعاد گلوله (mm)  |
| ۹۱/۶   | ۸۷/۲    | ۸۰/۳    | ۷۷/۳    | $d_{80}$ سرریز    |
| ۴۵   | ۴۰      | ۳۵*     | ۳۰      | درجه انباشتگی (%) |
| ۹۰   | ۸۷/۶    | ۸۷/۲    | ۹۰/۴    | $d_{80}$ سرریز    |
| -  | ۷۰      | ۶۲*     | ۴۰      | غلظت خوراک (%)    |
| -  | ۸۷/۳    | ۸۷/۲    | ۸۷/۲    | $d_{80}$ سرریز    |
| -  | ۳۰۰     | ۲۰۰*    | ۱۰۰     | خوراک (t/h)       |
| -  | ۹۹/۷    | ۸۷/۲    | ۶۵/۱    | $d_{80}$ سرریز    |
| ۳۰۰، ۳۰  | ۲۵۰، ۳۰ | ۳۰۰، ۲۵ | ۲۵۰، ۲۵ | خوراک، (t/h)      |
| ۹۴/۱   | ۸۸      | ۹۲/۴    | ۸۵/۵    | قطر گلوله (mm)    |

\* مقدار پارامتر در آسیای گلوله‌ای سه چاهون

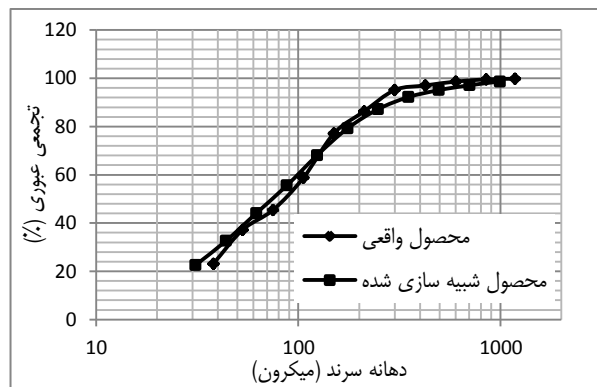
مقایسه شبیه‌سازی آسیا با درجه انباشتگی‌های مختلف نیز نشان می‌دهد، که  $d_{80}$  خروجی آسیا در درجه انباشتگی ۳۵ و ۴۰ درصد کمتر است. به عبارت دیگر با کاهش درجه انباشتگی به ۳۰ درصد و یا با افزایش آن به ۴۵ درصد، ابعاد مواد خروجی آسیا درشت‌تر خواهد شد. به نظر می‌رسد، که درجه انباشتگی فعلی آسیا (۳۵ درصد) مناسب باشد.

همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، تغییر درصد جامد خوراک تازه مدار آسیا تاثیری بر ابعاد مواد خروجی از آسیا نداشته است. احتمالاً رقت بیش از حد باطله مرحله کلینر که به مدار آسیا برگشت داده می‌شود، تاثیر غلظت خوراک تازه را کم می‌کند. البته این مسئله نیاز به بررسی بیشتر دارد.

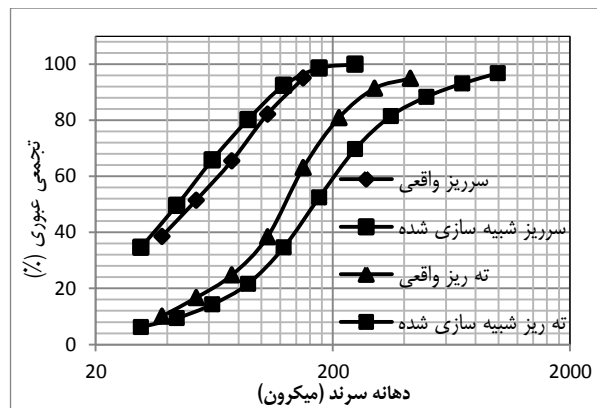
همچنین در جدول ۷ نتایج شبیه‌سازی آسیا با تغییر دبی خوراک تازه ورودی به مدار در دو سطح ۱۰۰ و ۳۰۰ تن بر ساعت با خوراک فعلی مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، که  $d_{80}$  سرریز هیدروسیکلون با افزایش تناژ خوراک ورودی، به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

از بین پارامترهای فوق، تاثیر همزمان دو پارامتر موثر؛ قطر

سازی شد و  $d_{80}$  سرریز هیدروسیکلون در هر حالت محاسبه شده است. سطوح پارامترهای بررسی شده و ابعاد سرریز هیدروسیکلون حاصله، در جدول ۷ آمده است. به عنوان مثال  $d_{80}$  سرریز هیدروسیکلون نسبت به تغییر ابعاد گلوله در سطوح ۲۵، ۳۰، ۴۲ و ۵۰ میلی متر، به ترتیب، ۷۷/۳، ۸۰/۳، ۸۷/۲ و ۹۱/۶ میکرون بوده است.

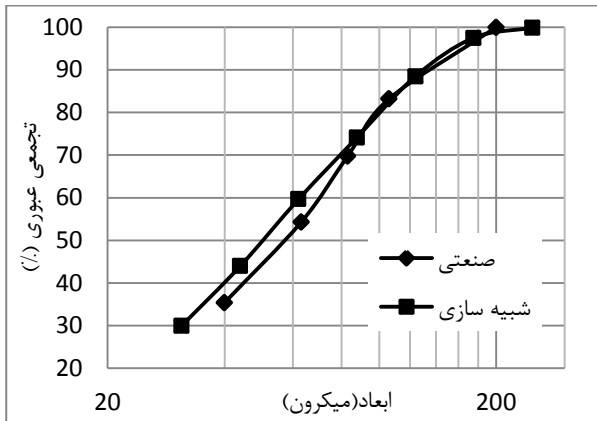


شکل ۳: مقایسه توزیع ابعاد واقعی و شبیه سازی شده خروجی آسیا در مدار بسته آسیای گلوله‌ای سه چاهون



شکل ۴: شبیه سازی عملکرد هیدروسیکلون سه چاهون با استفاده از نرم افزار MODSIM

تاثیر تغییر قطر گلوله‌ها، با استفاده از گلوله‌های ۲۵، ۳۰، ۴۲ و ۵۰ میلی‌متری (با توزیع ۱۰۰٪) شبیه‌سازی شد. مشاهده گردید، که با کاهش اندازه گلوله، توزیع ابعادی ( $d_{80}$ ) جریان خروجی از آسیا دانه‌ریزتر می‌شود. نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد، با کاهش ابعاد گلوله از ۵۰ به ۲۵ میلیمتر محصول نهایی مدار آسیا (سرریز هیدروسیکلون) از ۹۱/۶ به ۷۷/۳ میکرون کاهش پیدا کرده است. استفاده از گلوله‌های با قطر کمتر باعث افزایش میزان مصرف گلوله خواهد شد. بنابراین هزینه‌های مربوط به افزایش مصرف گلوله در هنگام بررسی اقتصادی تغییرات باید مد نظر قرار گیرد.



شکل ۴: مقایسه توزیع ابعادی هیدروسیکلون شبیه سازی شده و واقعیدر دبی خوراک ورودی ۳۰۰ تن بر ساعت

#### ۵- انتقال هیدروسیکلون به ابتدای مدار آسیا

بررسی توزیع دانه بندی جریان خوراک تازه ورودی به آسیای گلوله ای سه چاهون، نشان داد که حدود ۴۵٪ از مواد دارای ذراتی کوچکتر از ۸۰ میکرون (اندازه محصول مورد نظر) است. بنابراین این بخش از مواد علاوه بر مصرف بخشی از انرژی آسیا، باعث تولید نرمه بیشتری می شوند که می تواند بر عملکرد هیدروسیکلون و جداکننده های مغناطیسی نیز تأثیر منفی داشته باشد. از این رو به نظر می رسد که با قرار دادن هیدروسیکلون در ابتدای مدار می توان این بخش از مواد را از مدار خارج کرد. به عبارتی خوراک ورودی مدار، مستقیماً وارد هیدروسیکلون می شوند. جدول های ۸ و ۹ و شکل های ۷ و ۸ نتایج شبیه سازی مدار جدید را ارائه می دهند.

نتایج شبیه سازی نشان داد که قراردادن هیدروسیکلون قبل از آسیای گلوله ای باعث افزایش نسبت خردایش آسیا از ۱/۸۳ به ۳/۵۷ (جدول ۸) و کاهش دبی ورودی به آسیا از ۳۴۲ به ۱۵۰ تن بر ساعت (جدول ۷) می شود. ابعاد محصول نهایی مدار (سرریز هیدروسیکلون با  $d_{80} = 87/2 \mu m$ ) نیز برای جدایش مغناطیسی مرحله بعد مناسب می باشد. مقایسه توزیع ابعاد بار ورودی و خروجی آسیا در شرایط فعلی و فلوشیت پیشنهادی نیز نشان می دهد، که با وجود درشت تر شدن خوراک ورودی به آسیا، خروجی آسیا نسبتاً دانه ریزتر است (شکل ۷). شکل ۸ نیز نشان می دهد، در حالیکه توزیع ابعادی سرریز تقریباً مشابه است، ته ریز هیدروسیکلون در فلوشیت پیشنهادی دانه درشت تر است.

گلوله ها (۲۵ و ۳۰ میلیمتر) و تناژ خوراک (۲۵۰ و ۳۰۰ تن بر ساعت) بر عملکرد آسیا مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۷ نتایج این شبیه سازی ها را نشان می دهد.  $d_{80}$  سرریز هیدروسیکلون در دبی ۲۵۰ تن بر ساعت با گلوله های با قطر ۲۵ و ۳۰ میلیمتر کمتر از وضعیت فعلی کارخانه می باشد. در این حالت ظرفیت آسیا حدود ۵۰ تن بر ساعت افزایش یافته است.

#### ۴- تغییر پارامترها در مقیاس صنعتی

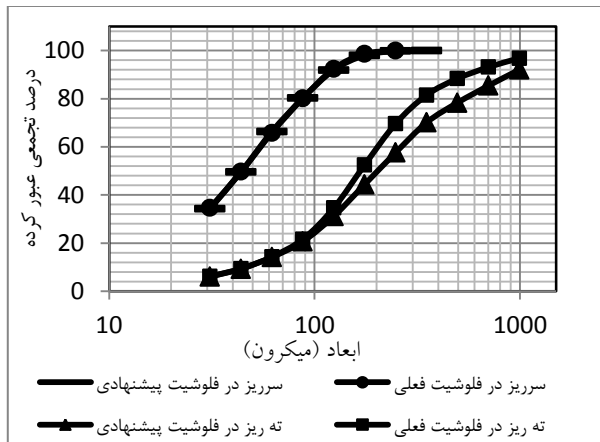
بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی، پارامترهای عملیاتی آسیای سه چاهون تغییر داده شد و تأثیر آن بر ابعاد محصول مدار آسیا ارزیابی شد و با نتایج شبیه سازی مقایسه گردید. به دلیل محدودیت های عملیاتی و ملاحظات صنعتی تنها پارامتر درصد جامد و دبی خوراک ورودی به آسیا در این بخش مورد مطالعه قرار گرفت. توزیع دانه بندی سرریز هیدروسیکلون شبیه سازی شده و کارخانه برای خوراک با ۷۰ درصد جامد و تناژ خوراک ۲۰۰ تن بر ساعت در شکل ۵ و خوراک با ۶۵ درصد جامد و دبی خوراک ۳۰۰ تن بر ساعت در شکل ۶ ترسیم شده است.



شکل ۵: مقایسه توزیع ابعادی سرریز هیدروسیکلون شبیه سازی شده و واقعی در درصد جامد ۷۰٪

شکل ۵ نشان می دهد که با افزایش درصد جامد به ۷۰ درصد،  $d_{80}$  سرریز هیدروسیکلون به حدود ۹۰ میکرون می رسد. که با  $d_{80}$  سرریز هیدروسیکلون در شبیه سازی تقریباً مشابه است. در این مورد خطای شبیه ساز در پیش بینی توزیع ابعادی سرریز هیدروسیکلون ۵/۲ درصد محاسبه شد. در شکل ۶،  $d_{80}$  سرریز هیدروسیکلون ۹۷ میکرون با مقدار آن در شبیه سازی مطابقت خوبی دارد. خطای شبیه ساز در تخمین توزیع ابعادی ۲/۲ درصد می باشد.

ترتیب به محصولی با  $d_{80}$ ، ۹۶ و ۱۱۰ میکرون دست یافت.



شکل ۸: توزیع دانه بندی سرریز و ته ریز هیدروسیکلون شبیه سازی شده مدار پیشنهادی آسیای گلوله ای سه چاهون و مقایسه با نتایج شبیه سازی مدار فعلی

#### ۶- جمع بندی

در این تحقیق شبیه سازی مدار آسیای گلوله ای خط سه-چاهون با استفاده از نرم افزار MODSIM انجام شده است. نتایج شبیه سازی مدار، همخوانی خوبی با داده های اندازه گیری شده در کارخانه داشت، به طوریکه خطای استاندارد توزیع ابعاد خروجی آسیای گلوله ای حدود ۶/۶۹ درصد بود. با توجه به دقت قابل قبول شبیه سازی با نرم افزار MODSIM، تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد مدار آسیای گلوله ای، با استفاده از این نرم افزار، بررسی شد.

از نتایج شبیه سازی معلوم شد که اندازه گلوله و دبی خوراک تازه، نسبت به دیگر پارامترها تأثیر بیشتری روی عملکرد مدار دارند. با کاهش اندازه گلوله تا ۲۵ میلی متر و افزایش دبی خوراک تازه تا ۳۰۰ تن بر ساعت، می توان به محصول مناسبی ( $d_{80}=92$ ) رسید. با این کار ضمن افزایش ظرفیت آسیا، انرژی ویژه مصرفی آن نیز کاهش می یابد.

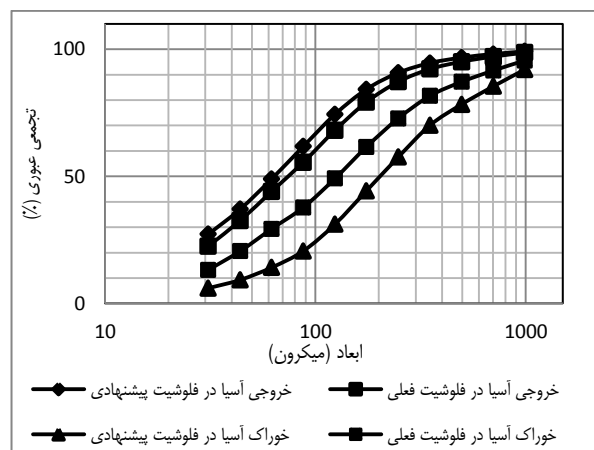
با توجه به اینکه حدود ۴۵ درصد مواد ورودی به آسیای گلوله ای در شرایط فعلی، دارای ابعاد کوچکتر از ۸۰ میکرون است، انتقال هیدروسیکلون به ابتدای مدار آسیا جهت افزایش کارایی مدار خردایش نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد، که با اصلاح مدار آسیا، در حالیکه دبی بار ورودی به آسیا کاهش می یابد، نسبت خردایش حدود ۲ برابر افزایش خواهد یافت. بنابراین در این حالت ظرفیت مدار افزایش می یابد. بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی در مدار پیشنهادی، نشان داد، که می توان با شارژ گلوله های ۲۵

جدول ۸: دبی جریان شبیه سازی شده در شاخه های مختلف مدار پیشنهادی برای آسیای گلوله ای سه چاهون در MODSIM

| مدار پیشنهادی         |           | شاخه جریان          |
|-----------------------|-----------|---------------------|
| دبی جامد (تن بر ساعت) | درصد جامد |                     |
| ۲۰۱/۶                 | ۶۲/۱۱     | خوراک تازه          |
| ۳۵۴/۰۶                | ۴۰/۸۷     | خوراک هیدروسیکلون   |
| ۲۰۴/۰۱                | ۳۰/۵۷     | سرریز               |
| ۱۵۰/۰۵                | ۷۵/۴۴     | ته ریز (خوراک آسیا) |
| ۱۵۰/۰۵                | ۷۵/۴۴     | خروجی آسیا          |
| ۲/۴                   | ۰/۷       | باطله برگشتی        |

جدول ۹: دانه بندی جریان های مدار بسته پیشنهادی شبیه سازی شده آسیای گلوله ای سه چاهون، در MODSIM

| مدار پیشنهادی | دانه بندی             |
|---------------|-----------------------|
| ۵۳۶           | خوراک آسیا $d_{80}$   |
| ۱۵۰           | محصول آسیا $d_{80}$   |
| ۲۲۴           | $d_{80}$ خوراک سیکلون |
| ۸۷/۲          | $d_{80}$ سرریز        |
| ۵۳۶           | $d_{80}$ ته ریز       |
| ۳/۵۷          | نسبت خردایش در آسیا   |
| ۳/۵۴          | نسبت خردایش مدار      |



شکل ۷: مقایسه خروجی شبیه سازی شده مدار فعلی و مدار پیشنهادی آسیای گلوله ای سه چاهون در MODSIM

در ادامه تأثیر تغییر پارامترهای قطر گلوله، دبی ورودی و درجه انباشتگی بر عملکرد مدار پیشنهادی نیز بررسی شده است. نتایج شبیه سازی نشان داد که تأثیر این پارامترها بر محصول مدار پیشنهادی مشابه تأثیر آنها بر مدار فعلی است. در این حالت با کاهش اندازه گلوله تا ۲۵ میلی متر و افزایش دبی خوراک تازه تا ۳۰۰ و ۴۰۰ تن بر ساعت، می توان به

9. Kraipecha Wanwilai, Chenb Wu, Dyakowskic Tom, Andrzej Nowakowskid; 'The performance of the empirical models on industrial hydrocyclone design'; Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakarinwirot University Ongkharuk, 2005.

۱۰. پرنده لیلا، دهقانی علی، خسروی مهدی، نوع پرست محمد، "مقایسه نتایج شبیه سازی مدار آسیای گلوله ای سه چاهون با نرم افزارهای MODSIM، COMSIM و BMCS"، نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن" دوره ششم، شماره یازدهم، ۱۳۹۰.

### پیوست

جدول پ ۱- توزیع ابعادی خوراک تازه و محصول مدار آسیای سه چاهون جهت استفاده در کالیبراسیون مدل های آسیا و هیدروسیکلون

| ابعاد     | خوراک تازه آسیا | سرریز سیکلون |
|-----------|-----------------|--------------|
| -۱۱۸۰+۸۵۰ | ۹۶/۴۵           | -            |
| -۸۵۰+۶۰۰  | ۹۴/۰۳           | -            |
| -۶۰۰+۴۲۵  | ۹۰/۴۶           | -            |
| -۴۲۵+۳۰۰  | ۸۶/۵۹           | -            |
| -۳۰۰+۲۱۰  | ۸۲/۲۲           | -            |
| -۲۱۰+۱۴۹  | ۷۳/۸۸           | ۹۷/۰۸        |
| -۱۴۹+۱۰۵  | ۶۵/۷۳           | ۹۳/۹۸        |
| -۱۰۵+۷۴   | ۵۲/۱۴           | ۸۰/۸۶        |
| -۷۴+۵۳    | ۴۵/۱۰           | ۶۶/۹۸        |
| -۵۳+۳۷    | ۳۱/۰۶           | ۵۰/۶۷        |
| -۳۷       | ۱۹/۷۸           | ۳۴/۳۲        |

میلیمتری و افزایش دبی خوراک تازه تا ۳۰۰ تن بر ساعت به محصولی مناسب (میکرون<sub>۹۶</sub>=d<sub>۸۰</sub>) دست یافت.

### تشکر و تقدیر

از مدیریت و کارشناسان محترم کارخانه فرآوری شرکت سنگ آهن مرکزی ایران (چگارت) به خاطر حمایت از انجام این تحقیق سپاسگزاری می شود.

### مراجع

- Morrison R.D and Richardson J.M., "JKSimMet: A Simulator for Analysis, Optimization and Design of Comminution Circuits", Mineral Processing Plant Design, Practice and Control, New York, 2002.
- King R. P., "Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems", Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- Gupta A. and Yan D.S., 'Introduction to Mineral Processing Design and Operation', Perth, Australia, January 2006.
- پرنده لیلا، بررسی عملکرد آسیای گلوله ای سه چاهون، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ۱۳۸۸.
- Yousefi A.A., Farzanegan, A., Irannezhad, M., "Breakage Function Determination Software <BFDS>", Version 1.0, Amirkabir University of Technology, Faculty of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2001.
- Farzanegan, A., "Numerical Grinding Optimization Tools in C (NGOTC)", PhD Thesis, McGill University Montreal, Canada, 1997.
- Javadi Farhad, Banisi Samad, "Residence Time Distribution Simulation Software In Open And Close Circuits", Shahid Bahonar Kerman University, 1376.
- Esmaili M.J., Solhi M. and Banisi S., "Modeling Hydrocyclone Performance Using Plitt's and Nagswarao's Models at the Interkarbon Coal Washing Plant", Shahid Bahonar Kerman University; 2009.