نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره هفتم، شماره شانزدهم، سال ۱۳۹۱، صفحه ۳۳ تا ۴۱
Vol. 7, No. 16, 2012, pp. 33-41

تأثیر شبکه تخلیه انتهایی در شبیه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای

زینب سادات میرزائی[۱]، اکبر فرزانگان[۲*]، علیرضا ولیان[۳]

۱- کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، mirzaei@farakap.com
۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران farzanegan@ut.ac.ir
۳- کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، a.valian@farakap.com

(دریافت۱۲ آبان ۱۳۸۹، پذیرش ۲ مرداد ۱۳۹۱)

چکیده

وجود شبکه و خصوصیات آن در عملکرد آسیاهای گلوله‌ای با تخلیه شبکه‌ای، خودشکن و نیمه‌خودشکن تأثیر بسیار زیادی دارد. طراحی شبکه، سطح باز و اندازه چشمه‌های شبکه بر ظرفیت خردایش تأثیرگذارند. طراحی نامناسب این عوامل در آسیاهای نیمه-خودشکن و خودشکن می‌تواند منجر به عدم کارایی سیستم خردایش و تشکیل استخر در آسیا شود که ً در صورت وقوع چنین حالتی هیچ عمل خردایشی در آسیا انجام نخواهد شد. در این پروژه برای اطمینان از شبیه‌سازی‌های هر چه دقیق‌تر مدار آسیاکنی و بهینه‌سازی استوار بر این شبیه‌سازی‌ها شبکه‌های تخلیه دو آسیای گلوله‌ای در مجتمع فسفات اسفوردی و مجتمع سنگ آهن گل‌گهر و تأثیر آن‌ها بر عملکرد این دو آسیا مطالعه شد. برای مطالعه و تعیین تأثیر شبکه تخلیه، از خوراک ورودی و محصول خروجی آسیاها در حالت یکنواخت مدار نمونه‌برداری شد. پس از موازنه جرم، جریان‌های خروجی مواد با استفاده از شبیه‌ساز BMCS® شبیه‌سازی و با دانه‌بندی واقعی محصول خروجی از آسیاها مقایسه شدند. نتایج نشان داد که شبکه موجود در آسیای گلوله‌ای اسفوردی بر دانه‌بندی محصول خروجی تأثیری ندارد، اما در آسیای گلوله‌ای موجود در مجتمع سنگ آهن گل‌گهر این شبکه همانند سرندی با چشمه‌های بسیار ریز عمل می‌کند و رفتار آن باید شبیه‌سازی شود.

کلمات کلیدی

شبکه تخلیه، آسیای گلوله‌ای، مجتمع فسفات اسفوردی، مجتمع سنگ آهن گل‌گهر، شبیه‌سازی، BMCS®، NGOTC®

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

آسیاهای گلوله‌ای بر اساس نوع تخلیه پالپ در آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. این آسیاها ممکن است به‌صورت آسیاهای با تخلیه سرریز که در مدار باز یا بسته کار می‌کنند، یا به صورت آسیاهای با تخلیه شبکه‌ای[1] باشند. در نوع دوم، شبکه‌ای میان بخش استوانه‌ای بدنه آسیا و یاتاقان تخلیه قرار دارد. پالپ به آسانی از چشمه‌های موجود در شبکه جریان می‌یابد و به یاتاقان تخلیه وارد می‌شود (شکل ۱) [۱].

شکل ۱: آسیا با تخلیه شبکه‌ای انتهایی

شبکه‌های تخلیه نقشی اساسی در تعیین عملکرد آسیاهای خودشکن، نیمه‌خودشکن و آسیاهای گلوله‌ای با تخلیه شبکه‌ای دارند. ظرفیت خردایش در این آسیاها به میزان زیادی تحت تأثیر طراحی شبکه یعنی سطح باز و محل چشمه‌ها و همچنین عملکرد بالابرهای پالپ می‌باشد. با توجه به این‌که در حال حاضر اندازه آسیاهای مورد استفاده به‌طور چشمگیری در حال افزایش است و مدار بسته نیز در خردایش بیشتر مورد توجه قرار دارد، اهمیت طراحی شبکه و بالابرهای پالپ در حال افزایش است[۲]،[۳].

در این آسیاها سطح پالپ نسبت به آسیاهای با تخلیه سرریز، پایین‌تر است و بنابراین زمان ماند ذرات در این آسیاها کاهش می‌یابد. بیش‌آسیاکنی در این آسیاها به میزان خیلی کم اتفاق می‌افتد و محصول تولیدی آسیا دارای ذرات درشتی است که توسط سیستم طبقه‌بندی به آسیا بازگردانده می‌شود. براساس بررسی‌های انجام شده، آسیاکنی در مدار بسته با بار در گردش زیاد نسبت به مدار باز، منجر به تولید محصول نهایی با اندازه یکپارچه و تولید بالا در واحد حجم می‌شود. به‌طور معمول خوراک آسیاهای با تخلیه شبکه‌ای از خوراک آسیاهای سرریز درشت‌تر است و برای خردایش بسیار ریز به‌کار نمی‌روند. که دلیل اصلی این است که گلوله‌های ریز در این حالت به راحتی چشمه‌های شبکه را مسدود می‌کنند.

آسیاهای با تخلیه سرریز از نظر عملکرد ساده‌ترین آسیاها محسوب می‌شوند و در بسیاری از عملیات خردایش با آسیای گلوله‌ای، و به‌خصوص در خردایش ریز و آسیاکنی مجدد، از این آسیا استفاده می‌شود. طبق بررسی‌های انجام شده، مصرف انرژی در آسیای با تخلیه سرریز ۱۵٪ کمتر از آسیای با تخلیه شبکه‌ای و با اندازه مشابه است اما بازدهی خردایش هر دو آسیا یکسان است. در آسیاهای با تخلیه سرریز، به‌طور معمول حجم شارژ برابر ۴۰٪ حجم داخلی آسیا درنظر گرفته می‌شود در حالی‌که در آسیاهای با تخلیه سرریز می‌توان این مقدار را بیشتر درنظر گرفت. از این‌رو در این آسیاها سرعت بهینه آسیا با افزایش حجم شارژ افزایش می‌یابد [۱].

به‌طور معمول در آسیاهای با تخلیه از نوع سرریز که به‌صورت تر کار می‌کنند، محصول تولیدی توسط یاتاقان تخلیه سرریز از آسیا خارج می‌شود. نیروی محرک برای جریان یافتن پالپ از دهانه ورودی خوراک به سمت دهانه خروجی، تغییرات جریان است که به دلیل بزرگ‌تر بودن یاتاقان تخلیه از یاتاقان ورودی، ایجاد می‌شود. با این‌حال آسیاهای با تخلیه شبکه‌ای دارای مکانیسم پیچیده‌تری هستند [۲]،[۳].

شبکه علاوه بر آسیاهای گلوله‌ای، در آسیاهای نیمه خودشکن و خودشکن نیز استفاده می‌شود. شبکه نشان داده شده در شکل ۲، به‌منظور جلوگیری از خروج واسطه خردایش از آسیا و ایجاد امکان خروج ذرات دانه‌ریز و پالپ از آسیا است. شکل دهانه‌های شبکه ممکن است به‌صورت مربع، گرد و یا به‌صورت شکاف با اندازه متغیر از ۱۰ تا ۴۰ میلی‌متر باشد. سطح کل باز شبکه در حدود ۲ تا ۱۲٪ سطح مقطع آسیا است [۱]. متغیرهای مهم مربوط به شبکه در جدول ۱ بیان شده‌اند.

اجزای مختلف مربوط به آسیایی که از نوع تخلیه شبکه‌ای است، در شکل ۲ نمایش و در ادامه شرح داده شده است.

یاتاقان خوراک: مجموعه‌ای که از طریق آن مواد جامد و آب وارد آسیا می‌شوند.

پوسته آسیا: محفظه اصلی که ذرات کانسنگ در اثر گردش آسیا در داخل آن خرد می‌شوند.

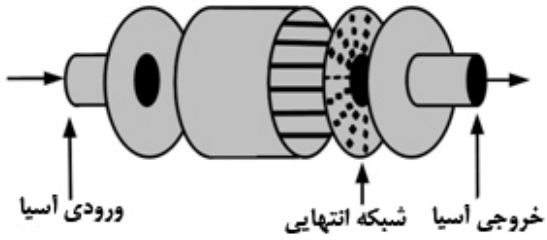
شبکه: شبکه‌ای که تنها به ذرات خرد شده و آب که تشکیل پالپ را می‌دهند، اجازه عبور می‌دهد.

یاتاقان تخلیه: مجموعه‌ای که از طریق آن محصول آسیا خارج می‌شود.

جدول ۱: متغیرهای طراحی شبکه‌های تخلیه[۳]

ویژگی	مشخصات
سطح باز	۲ تا ۱۲٪ سطح مقطع قائم آسیا در آسیاهای با بالابر تشتکی و حداکثر ۲۵٪ در آسیاهای تخلیه انتهایی
اندازه چشمه‌ها	۱۰ تا ۴۰ میلی‌متر
شکل چشمه‌ها	مربعی، گرد یا شکاف
چیدمان چشمه‌ها	در فواصل مختلف شعاعی در ساختار دیافراگمی که تقریباً موازی با سطح مقطع قائم آسیا هستند؛ یا به‌صورت ردیف موازی بدنه آسیا و نزدیک به هم قرار می‌گیرند.

در برخی از آسیاها پس از شبکه تخلیه بالابرهای پالپ نیز وجود دارند که پالپ عبوری را به یاتاقان تخلیه متقل می‌کنند.



شکل ۲: نمایی از اجزای مختلف همراه با شبکه در آسیای با تخلیه شبکه‌ای

لاتچیردی[۲] و مورل[۳] [۲]،[۳] در پژوهش‌های مختلفی تأثیر طراحی شبکه بر عملکرد آسیا را بررسی کرده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که طراحی شبکه، درصد جامد و شدت جریان خوراک تأثیر مهمی بر ماندگی پالپ در داخل آسیا دارند. همچنین در بررسی دیگری مشاهده شد که ماندگی پالپ به میزان زیادی به درصد سطح باز و محل چشمه‌های شبکه وابسته است و رابطه‌ای خطی میان سطح باز و شدت جریان به‌دست آمد. همچنین مشاهده شده است با افزایش سرعت آسیا، ماندگی پالپ نیز افزایش می‌یابد. همچنین این پژوهشگران تأثیر سطح باز شبکه بر ماندگی پالپ را بررسی کردند و مشاهده کردند که در جریان چشمه‌ای، شدت جریان تخلیه به‌طور مستقیم با سطح چشمه متناسب است و شدت جریان تخلیه از شبکه با افزایش سطح باز، زیاد می‌شود. این امر منجر به کاهش مقادیر ماندگی پالپ در داخل آسیا می‌شود.

مدلسازی «طبقه بندی خروج[۴]» و تأثیر آن بر نتایج شبیه‌سازی توسط آستین[۵] و همکاران [۴]، چو[۶] و آستین [۵] و آستین و همکاران [۶] مورد بحث قرار گرفته است. مقایسه توزیع اندازه ذره اندازه‌گیری شده محصول خروجی از آسیاهای نیمه خودشکن و گلوله‌ای در مدار باز با توزیع اندازه ذره پیش‌بینی شده با شبیه‌سازی در مطالعات موردی مختلف توسط این پژوهشگران عدم تطبیق هماهنگ آن‌ها را نشان می‌دهد که دلیل آن را «طبقه‌بندی خروج» دانسته‌اند. این پژوهشگران در ارایه نتایج شبیه‌سازی آسیاکنی گلوله‌ای به روش تر در مقیاس صنعتی [۵] اشاره کرده‌اند که عدم لحاظ کردن طبقه بندی خروج در مدل ریاضی شبیه سازی منجر به پیش‌بینی نادرست توزیع اندازه خروجی آسیا و در نتیجه پیش‌بینی نادرست بار در گردش خواهد شد.

همچنین، ناپیر مان[۷] و همکاران [۷] فرآیند طبقه بندی خروج به دلیل وجود شبکه تخلیه را در آسیاهای خود شکن و نیمه‌خودشکن بررسی کرده‌اند و استفاده از تابع طبقه‌بندی را برای مدل‌سازی آن پیشنهاد کرده‌اند. این مدل تابع طبقه-بندی برای عبور ذرات با اندازه‌ای کوچکتر از اندازه چشمه‌های شبکه و ذراتی که رفتار آن‌ها مانند آب است را خطی در نظر می‌گیرد.

در ایران، تاکنون مطالعه‌ای در مورد مدلسازی فرآیند «طبقه‌بندی خروج» که می‌تواند به دلیل وجود شبکه تخلیه در انتهای آسیا پیش آید و تأثیر آن بر شبیه‌سازی مدار آسیاکنی انجام نشده است. دهقانی احمد آبادی [۸] مدار آسیای گلوله‌ای کارخانه فسفات اسفوردی را بدون در نظر گرفتن شبکه تخلیه در مدل ریاضی مدار، شبیه سازی نموده است. در مقاله عظیمی و همکاران [۹] نتایج بررسی‌ها در مورد شبکه تخلیه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه ارایه شده است که هدف آن بررسی تغییرات عواملی مانند ابعاد شکاف‌های شبکه و سطح باز در یک بازه زمانی مشخص کارکرد آسیا و تعیین عمر مفید شبکه تخلیه نصب شده و کمک به برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری قطعات مصرفی بوده است.

در این مقاله، نویسندگان سعی کرده‌اند نتایج بررسی و مطالعه خود در مورد شبکه تخلیه دو آسیای گلوله‌ای در کارخانه‌های فرآوری فسفات اسفوردی و سنگ آهن گل‌گهر را از دیدگاه مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی فرآیند ارایه کنند.

۲- مدل‌سازی فرآیند طبقه بندی شبکه تخلیه

یکی از روش‌هایی که چو و آستین [۵] برای مدلسازی فرآیند طبقه بندی خروج پیشنهاد کردند بر اساس وجود یک کلاسیفایر در انتهای آسیاست. تابع طبقه‌بندی خروج کلاسیفایر تخلیه به شکل زیر است:

$$c_i = \frac{1}{1+\left(x_i / d_{50}\right)^{-\gamma}} \qquad (۱)$$

که در آن c_i مقدار تابع طبقه بندی برای فاصله اندازه iام، x_i اندازه معرف فاصله اندازه i ام، d_{50} اندازه‌ای است که در آن اندازه، c_i معادل ۵/۰ و γ مقدار ثابت می‌باشند. مقدار کسر جرمی که به دلیل طبقه‌بندی خروج به آسیا برمی‌گردد، s_i از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$s_i = a + (1-a)c_i \qquad (۲)$$

که در آن a کسر جرم برگشتی به آسیا به علت پدیده دور زدن[۸] یا مدار کوتاه در کلاسیفایرهای واقعی است. چنانچه a برابر صفر باشد که به‌طور معمول برای طبقه‌بندی خروج چنین فرضی صحیح است، آنگاه $s_i=c_i$ و خواهیم داشت:

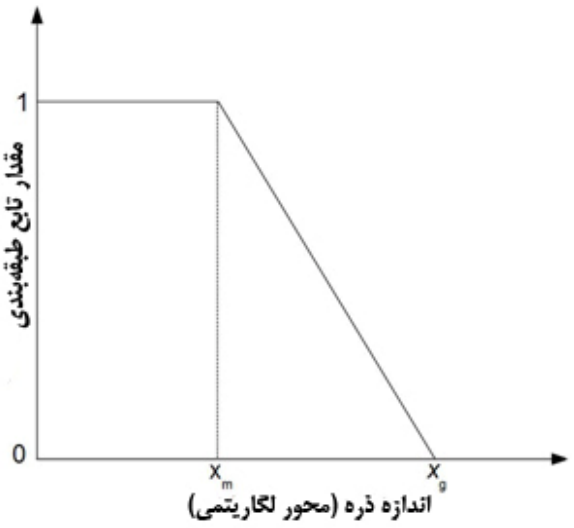
$$s_i = \frac{1}{1+\left(x_i / d_{50}\right)^{-\gamma}} \qquad (۳)$$

مقدار ثابت γ در این حالت خاص γ_1 است که با شاخص تیزی جدایش، SI، رابطه زیر را دارد:

$$\gamma_1 = \frac{0.9553}{-\log(SI)} \qquad (۴)$$

روش مدل‌سازی توضیح داده شده در بالا روشی تجربی است که به سادگی قابل اجراست [۵].

ناپیر مان و همکاران [۷] برای مدل‌سازی شبکه تخلیه از تابع ساده‌تری که یک تابع خطی است استفاده کرده‌اند. در این روش، پالپ خروجی از آسیا به دو بخش تقسیم می‌شود. یکی از این دو بخش مانند آب عمل می‌کند و نرخ تخلیه آن بر حسب اندازه توسط بخش تقریباً افقی شکل ۳ قابل نمایش است. بخش دوم تحت تأثیر عمل طبقه‌بندی توسط شبکه است و بنابراین رفتاری مانند جامد خواهد داشت [۷]. براساس شکل ۳ و در نظر گرفتن اندازه چشمه‌ها برابر X_g، مشاهده می‌شود که ذراتی با ابعاد صفر تا کمتر از X_m، همانند آب عمل می‌کنند و تحت تأثیر عمل طبقه‌بندی قرار نمی‌گیرند. مقدار تابع طبقه‌بندی برای این ذرات برابر عدد ۱ است. اما با افزایش اندازه ذرات، مقدار تابع طبقه‌بندی کاهش می‌یابد و هنگامی‌که اندازه ذرات به X_g یا اندازه چشمه شبکه می‌رسد، این تابع دارای مقداری برابر صفر می‌شود. این بدان معناست که با افزایش اندازه ذره از X_m ، مقاومت در برابر عبور ذرات از شبکه بیشتر می‌شود تا جایی که با صفر شدن مقدار تابع طبقه‌بندی، امکان عبور برای ذرات وجود نخواهد داشت.



شکل ۳: تابع طبقه‌بندی شبکه تخلیه

۳- روش انجام تحقیق

در این مقاله دو آسیای گلوله‌ای مجهز به شبکه تخلیه انتهایی در کارخانه‌های فرآوری فسفات اسفوردی و سنگ آهن گل‌گهر برای مطالعه تأثیر شبکه بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند آسیاکنی در نظر گرفته شدند. به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات، از جریان‌های خوراک و محصول هر دو آسیای گلوله‌ای در دو حالت یکنواخت مختلف نمونه‌برداری و سپس وزن، دانه‌بندی و درصد جامد تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه تعیین شدند. در مرحله بعد داده‌های به‌دست آمده توسط نرم‌افزار NORBAL موازنه جرم و تعدیل شدند.

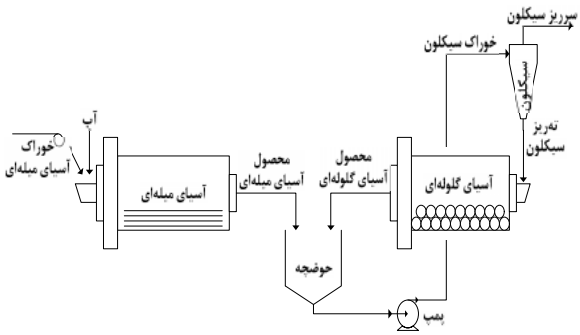
تابع انتخاب هر یک از آسیاهای گلوله‌ای با استفاده از نرم‌افزار NGOTC® [۹] (نسخه ۳ , ۱) محاسبه شد. در نهایت، شبیه‌سازی مدار براساس داده‌های به‌دست آمده و تابع انتخاب

تخمین زده شده، با استفاده از نرم‌افزار BMCS® [10] (نسخه ۵) انجام شد.

۴- مجتمع فسفات اسفوردی

۴-۱- تشریح مدار آسیاکنی

کانسنگ استخراج‌شده از معدن ابتدا در کارخانه سنگ‌شکنی خرد می‌شود و محصول این کارخانه با ابعاد صفر تا ۲۲ میلی‌متر توسط ۳ تغذیه‌کننده لرزان و نوار نقاله به آسیای میله‌ای کارخانه پرعیارسازی وارد می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴: مدار آسیاکنی مجتمع فسفات اسفوردی

مرحله اول آسیاکنی در آسیای میله‌ای پیوسته انجام می‌شود و خوراک با اندازه صفر تا ۲۲ میلی‌متر تا رسیدن به ابعاد ۸۰٪ کوچکتر از ۶/۰ میلی‌متر خرد می‌شود. خروجی آسیای میله‌ای با ابعاد صفر تا ۵ میلی‌متر، پس از ورود به حوضچه و تنظیم رقت، توسط پمپ، به هیدروسیکلون اولیه وارد می‌شود و در آن طبقه‌بندی می‌شود تا سرریزی با d_{98} برابر ۱۵۰ میکرون بدست آید. تەریز این هیدروسیکلون پس از رقیق شدن، وارد مجرای خوراک‌دهی به آسیای گلوله‌ای می‌شود. مواد خرد شده در آسیای گلوله‌ای با ابعاد صفر تا ۱ میلی‌متر به حوضچه جمع‌آوری مواد وارد و با مواد خروجی از آسیای میله‌ای مخلوط و برای انجام طبقه‌بندی بیشتر به هیدروسیکلون ذکر شده وارد می‌شود. سرریز هیدروسیکلون اولیه که محصول نهایی مدار خردایش است، وارد حوضچه‌ای می‌شود که در صورت نیاز می‌توان آنرا تا رسیدن به درصد جامد ۱۸٪ قبل از ورود آن به هیدروسیکلون نرمه‌گیر، رقیق کرد.

۴-۲- آسیای گلوله‌ای مجتمع فسفات اسفوردی

آسیای گلوله‌ای نصب شده در مجتمع فسفات اسفوردی از نوع آسیاهای گلوله‌ای با شبکه تخلیه انتهایی است. در جدول ۲ مشخصات این آسیا و شرایط عملیاتی آن داده شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی و عملیاتی آسیای گلوله‌ای مجتمع فسفات اسفوردی طبق طراحی

ویژگی	مشخصات
نوع تخلیه آسیا	تخلیه شبکه‌ای انتهایی
شدت جریان خوراک مدار (t/h)	۴۶
بار در گردش (٪)	۱۵۰
اندازه خوراک، d_{80} (mm)	۷۵/۰
اندازه محصول، d_{80} (mm)	۱/۰
نسبت خردایش	۵/۷
توان موتور (kW)	۳۱۵
طول آسیا (m)	۳
قطر آسیا (m)	۴/۲

با مقایسه داده‌های حاصل از آزمایش و داده‌های مربوط به طراحی آسیای گلوله‌ای مشاهده می‌شود که اختلاف زیادی میان عملکرد فعلی آسیا و عملکرد مورد نظر در طراحی آن وجود دارد. مهم‌ترین اختلافات قابل مشاهده در نسبت خردایش درنظر گرفته شده برای آسیا و نسبت خردایش فعلی آن و همچنین میزان بار در گردش در زمان طراحی و در حال حاضر است. آنچه که از نتایج آزمایش توزیع دانه‌بندی می‌توان نتیجه گرفت، آن است که در واقع هیچ عمل خردایشی در این آسیا صورت نمی‌گیرد.

۴-۳- مشخصات شبکه آسیای گلوله‌ای مجتمع فسفات اسفوردی

در شکل ۵ و شکل ۶ تصاویری از شبکه آسیای گلوله‌ای دیده می‌شود. این شبکه از ۱۲ قطاع تشکیل شده است که در هر قطاع، ۱۵۳ چشمه به شکل مستطیل وجود دارد. ابعاد این چشمه‌ها برابر ۲۷ میلی‌متر در ۱۲ میلی‌متر است که میزان سطح باز شبکه برابر ۵۹/۰ متر مربع، معادل ۷۳/۴٪ سطح مقطع عمودی آسیا است. با محاسبه میانگین حسابی ابعاد چشمه‌ها، می‌توان به قطر ذره‌ای دایره‌ای شکل که معادل ابعاد چشمه‌هاست، دست یافت. این قطر برابر ۵/۱۹ میلی‌متر محاسبه می‌شود.

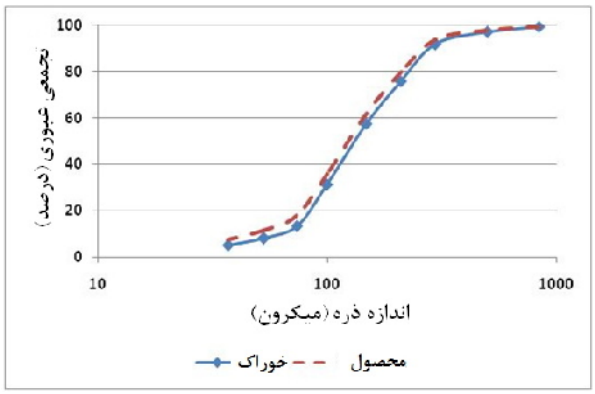
شکل ۵: قطاع‌های تشکیل‌دهنده شبکه تخلیه انتهایی در آسیای گلوله‌ای اسفوردی

شکل ۶: شبکه تخلیه انتهایی آسیای گلوله‌ای اسفوردی

۴-۴- جمع‌آوری داده‌ها

در شکل ۷ توزیع دانه‌بندی جریان‌های خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای نشان داده شده است. با برازش مدل رزین راملر به داده‌های بدست آمده از موازنه جرم، مقدار d_{80} جریان‌های خوراک و محصول آسیا به‌دست آمد.

در جدول ۳ شدت جریان، درصد جامد و d80 جریان‌های اطراف آسیای گلوله‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت خردایش در این آسیا برابر ۰۶۵/۱ می‌باشد. همچنین میزان بار در گردش آسیا ۶۵۳٪ محاسبه شد.

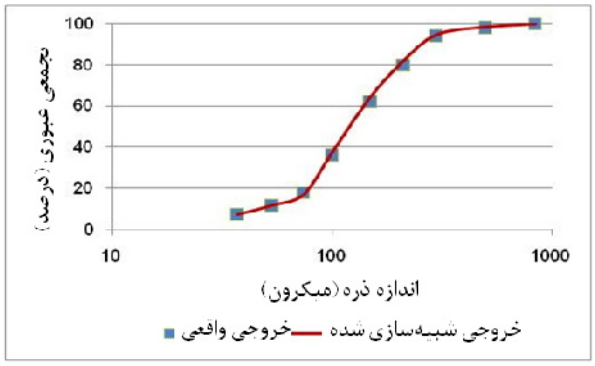


شکل ۷: دانه‌بندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی

جدول ۳: مشخصات جریان‌های اطراف آسیای گلوله‌ای کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی

جریان	دبی پالپ (t/h)	محتوی جامد (٪)	آب (t/h)	اندازه d_{80} (µm)
خوراک	۳/۴۳۴	۹/۷۱	۰۳/۱۲۲	۹/۲۰۶
محصول	۳/۴۳۴	۹/۷۱	۰۳/۱۲۲	۳/۱۹۴
آب افزودنی به خوراک	۱/۳۲	۰/۰	۱/۳۲	-

همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، ۱۰۰٪ خوراک از ۸۴۱ میکرون کوچکتر است. بنابراین با در نظر گرفتن قطر معادل اندازه چشمه‌های شبکه (۱۹۵۰۰ میکرون)، مشاهده می‌شود که اندازه بزرگترین ذرات خوراک ورودی به آسیای گلوله‌ای حدود ۲۳ برابر کوچکتر از اندازه چشمه‌های شبکه است. دانه‌بندی شبیه‌سازی شده و خروجی خروجی آسیا در شکل ۸ مقایسه شده است.



شکل ۸: مقایسه دانه‌بندی شبیه سازی شده و واقعی خروجی آسیا

همان‌گونه که از شکل ۸ مشاهده می‌شود، دانه‌بندی واقعی و شبیه‌سازی شده ذرات در جریان خروجی آسیا به‌طور کامل مشابه هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تابع انتخاب به درستی تخمین زده شده است و دانه‌بندی مواد خروجی با دانه‌بندی مواد در پشت شبکه کاملاً یکسان است.

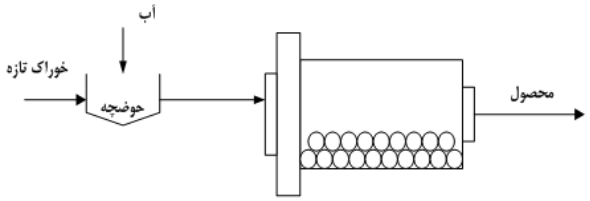
چو و آستین [۵] گزارش کرده‌اند که ذرات با اندازه حتی یک بیستم اندازه چشمه‌های شبکه تخلیه به‌طور ترجیحی داخل آسیا می‌مانند و از خروج آنها توسط شبکه جلوگیری می‌شود.

از سوی دیگر، با توجه به نتیجه‌ای که در بررسی‌های انجام گرفته توسط بنزر[11] و همکاران [۱۰ و ۱۱] بدست آمده است، مشخص گردیده هنگامی‌که اندازه چشمه‌های سطح مشبک ۱۰ برابر بزرگتر از اندازه بزرگترین ذره خوراک ورودی به آسیاست، شبکه تخلیه مانند سرندی بسیار ریز عمل می‌کند و لازم است عملکرد آن مدلسازی است. در واقع احتمال عبور ذرات از سطح باز شبکه به دلیل سرعت دوران آسیا کاهش می‌یابد و با آنکه اندازه چشمه‌های شبکه بسیار بزرگتر از اندازه بزرگترین خوراک ورودی به آسیاست، اما تأثیر طبقه‌بندی شبکه بر روی محصول خروجی اعمال می‌شود.

همان‌طور که در بالا ذکر شد، در کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی ذرات ورودی به آسیای گلوله‌ای با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌ها حدود ۲۳ بار کوچک‌تر از اندازه چشمه‌های سرند هستند. بنابراین با توجه به یافته‌های قبلی چو و آستین [۵] می‌توان با اطمینان کافی نتیجه گرفت که در شرایط عملیاتی کنونی وجود شبکه در آسیای گلوله‌ای تأثیری بر توزیع اندازه جریان خروجی ندارد و می‌توان آسیا را همچون آسیای با تخلیه سرریز فرض کرد. در واقع این شبکه در داخل آسیا به عنوان مانع خروج واسطه خردایش عمل می‌کند و ذرات آزادانه از آن عبور می‌کنند. این نتیجه‌گیری از لحاظ شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای اسفوردی حایز اهمیت است و در مرحله اعتبار سنجی مدلی که برای شبیه‌سازی در پروژه‌های بهینه سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد کمک مؤثر می‌کند.

۵- مجتمع سنگ آهن گل‌گهر

مجتمع سنگ آهن گل گهر در سیرجان، استان کرمان واقع است. آسیای گلوله‌ای مورد مطالعه در این مجتمع، آسیای اولیه واحد نیمه صنعتی مجتمع مزبور است. مشخصات این آسیا در جدول ۴ داده شده است. تخلیه شبکه‌ای در مدار باز تشکیل شده است. مدار آسیاکنی در شکل ۹ نشان داده شده است.



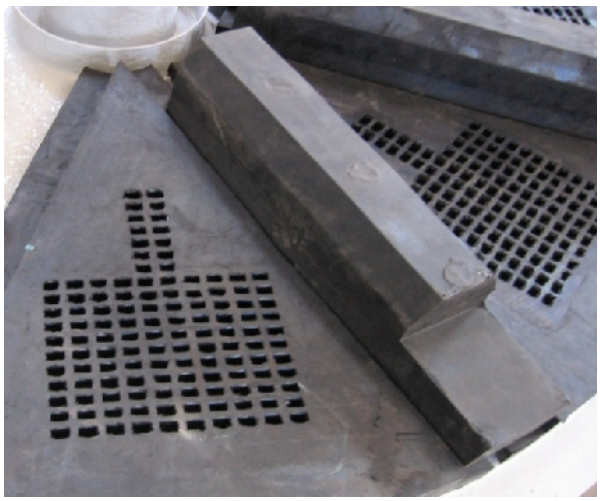
شکل ۹: مدار آسیای گلوله‌ای واحد نیمه صنعتی مجتمع سنگ آهن گل‌گهر

جدول ۴: مشخصات فنی و عملیاتی آسیای گلوله‌ای واحد نیمه صنعتی مجتمع سنگ آهن گل گهر [۱۲]

ویژگی	مشخصات
نوع تخلیه آسیا	تخلیه شبکه‌ای انتهایی
شدت جریان خوراک (t/h)	۵/۰تا ۴
اندازه خوراک، d_{80} (mm)	۵/۷
اندازه محصول، d_{80} (mm)	۳۵/۰
نسبت خردایش	۲۱
توان موتور (kW)	۳۸
طول آسیا (m)	۷/۱
قطر آسیا (m)	۵/۱

۵-۱- مشخصات شبکه آسیای گلوله‌ای گل‌گهر

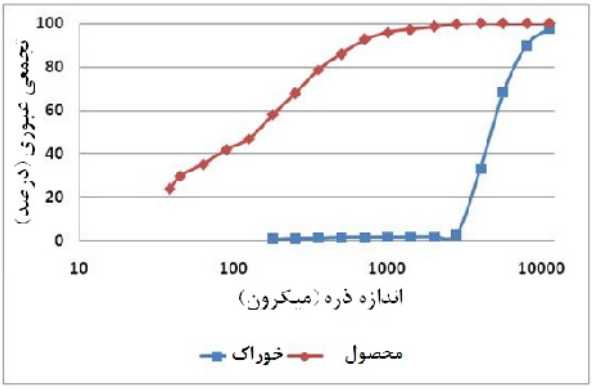
در شکل ۱۰ شبکه موجود در آسیای گلوله‌ای گل‌گهر نشان داده شده است.



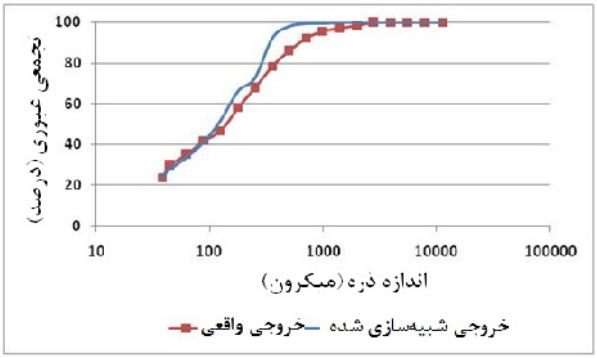
شکل ۱۰: شبکه تخلیه انتهایی آسیای گلوله‌ای واحد نیمه صنعتی مجتمع سنگ آهن گل‌گهر

این شبکه از ۸ قطاع با ۱۳۲ چشمه مربعی شکل در هر قطاع تشکیل شده است. اندازه هر یک از این چشمه‌ها ۹ میلی‌متر × ۹ میلی‌متر است که قطر معادل ذره‌ای دایره‌ای شکل که می‌تواند از این چشمه‌ها عبور کند برابر ۹ میلی‌متر محاسبه می‌شود [۱۲].

دانه‌بندی خوراک و محصول این آسیا در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل و قطر معادل ذره چشمه‌های شبکه، مشاهده می‌شود که اندازه بزرگترین ذره موجود در خوراک تقریباً برابر با اندازه قطر معادل چشمه‌های شبکه می‌باشد.



شکل ۱۱: دانه‌بندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای گل‌گهر



شکل ۱۲: مقایسه دانه‌بندی واقعی و شبیه‌سازی شده محصول آسیای گلوله‌ای گل‌گهر

در شکل ۱۲ مقایسه‌ای میان دانه‌بندی شبیه‌سازی شده و واقعی محصول آسیا انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی بخش دانه ریز در محصول آسیا توسط نرم‌افزار BMCS دقیق‌تر از شبیه‌سازی بخش دانه درشت انجام شده است.

از آنجا که نمونه‌برداری از محصول آسیا پس از شبکه انجام شده است، بنابراین سینتیک خردایش بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود و بخش دانه درشت در محصول شبیه‌سازی شده، ریزتر از مقدار واقعی خواهد بود. اما از آنجا که ذرات دانه ریز از چشمه‌های شبکه به راحتی عبور می‌کنند و تحت تأثیر طبقه‌بندی شبکه قرار نمی‌گیرند، تابع انتخاب یا سینتیک خردایش در این بخش از محصول به‌طور دقیق تخمین زده می‌شود و به این ترتیب دانه‌بندی محصول شبیه‌سازی شده در بخش دانه‌ریز بسیار شبیه به دانه‌بندی محصول واقعی خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

نوع تخلیه در انتهای یک آسیای گردان بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی آن می‌تواند به‌شدت تأثیر بگذارد. از آنجا که در آسیاهای گلوله‌ای با تخلیه سرریز طبقه‌بندی ذرات در انتهای آسیا وجود ندارد، می‌توان از مدل موازنه جمعیتی برای مدل-سازی و شبیه‌سازی این نوع آسیاها استفاده کرد. در آسیاهای گلوله‌ای با شبکه تخلیه انتهایی استفاده از مدل موازنه جمعیتی بدون در نظر گرفتن تأثیر نوع تخلیه مواد در انتهای آسیا می‌تواند منجر به کاهش دقت دانه‌بندی‌های پیش‌بینی شده توسط مدل شود. این به دلیل آنست که شبکه تخلیه انتهایی موجود در داخل آسیا در واقع یک مرحله طبقه‌بندی بر روی محصول خرد شده آسیا انجام می‌دهد و مانع از خروج ذرات درشت‌تر از چشمه شبکه از آسیا می‌شود. بنابراین تخمین تابع انتخاب که یکی از پارامترهای اصلی در مدل ریاضی آسیاهاست بر اساس نمونه خروجی در این نوع آسیاها می‌تواند در مقایسه با آسیاهای با تخلیه سرریز می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای دچار خطا شود. در آسیاهای با تخلیه سرریز، هیچ‌گونه مقاومتی در مقابل جریان پالپ محصول خروجی از آسیا وجود ندارد و نمونه خروجی معرف محصول آسیاست. با این وجود، در آسیاهای با شبکه تخلیه انتهایی می‌توان با متوقف کردن آسیا و نمونه‌برداری از داخل آن (قبل از شبکه)، عملکرد مدار آسیاکنی را با دقت بیشتر شبیه‌سازی کرد.

همچنین پارامترهای طراحی شبکه و نیز شرایط عملیاتی آسیا بر روی زمان اقامت مواد در داخل آسیا تأثیر دارند. در آسیاهای با تخلیه سرریز، مواد زمان اقامت کوتاه‌تری را تجربه می‌کنند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد آسیای گلوله‌ای و

شبیه‌سازی آن، پیشنهاد می‌شود از داخل آسیا نیز نمونه‌برداری انجام شود تا تابع انتخاب آسیا به‌طور دقیق را بدست آید و شبیه‌سازی دقیقی انجام شود.

در این مقاله دو آسیای گلوله‌ای با تخلیه شبکه‌ای انتهایی بررسی شد. مشاهده شد ذراتی که به‌طور تقریبی ۲۳ بار کوچک‌تر از چشمه‌های شبکه هستند، به راحتی از شبکه عبور می‌کنند و شبکه تأثیری بر دانه‌بندی آنها نخواهد داشت. این در حالیست که ذرات هم اندازه با چشمه‌های شبکه، تحت تأثیر شبکه قرار می‌گیرند. در چنین مواقعی شبکه همانند سرند بسیار ریز عمل می‌کند که لازمست رفتار آن مدل‌سازی شود. در حقیقت با آن‌که اندازه چشمه‌ها بزرگ‌تر از اندازه بزرگ‌ترین ذره موجود در خوراک است، اما سرعت دورانی آسیا باعث کاهش احتمال عبور ذرات از شبکه می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت مالی دانشگاه تهران از این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۰۱/۱/۲۷۹۴۳ قدردانی می‌نمایند. همچنین از کارکنان مجتمع فسفات اسفوردی، به ویژه مدیریت محترم گروه فرآیند، آقای مهندس توکلی و همچنین مجتمع فرآوری سنگ آهن گل گهر به خاطر همکاری صمیمانه در اجرای این پژوهش و در اختیار گذاردن اطلاعات مورد نیاز سپاسگزاری می‌شود.

منابع

[1] Wills, B. A., Napier-Munn, T. J.; 2006; "*Mineral Processing Technology";* 7th Edition, Elsevier Science & Technology Books.

[2] Latchireddi, S., Morrell, S.; 2003; "*Slurry flow in mills: grate-only discharge mechanism (Part-1)";* Minerals Engineering, pp. 625-633.

[3] Latchireddi, S., Morrell, S.; 2003; "*Slurry flow in mills: grate-pulp lifter discharge systems (Part-2)*"; Minerals Engineering, pp. 635-642.

[4] Austin, L.G., Barahona, C.A., Weymont, N. P., Suryanarayanan, K.; 1986*; "An improved simulation model for semi-autogenous grinding*"; Powder Technology, Vol. 47, No.3 , pp. 265-283.

[5] Cho, H., Austin, L. G.; 2004; "*A study of the exit classification effect in wet ball milling"*; Powder Technology, 143– 144, pp. 204– 214.

[6] Austin,G. L., Julianelli., K., De Souza, A. S., Schneider, C.; 2007; "*Simulation of wet ball milling of iron ore at Carajas, Brazil*"; Int. J. Miner. Process. 84, pp. 157–171.

[7] Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R. D., Kojovic, T.; 1999; "*Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation";* JKMRC.

[۸] دهقانی احمدآبادی، علی؛ (۱۳۸۶)؛ **"مطالعه و بررسی امکان خارج‌سازی آسیای گلوله‌ای از مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی"**، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

[۹] عظیمی، ابراهیم؛ بنیسی، صمد؛ لنگری زاده، غلامرضا و دهقانی مالک؛ (۱۳۸۷)؛ **"بررسی عملکرد شبکه های تخلیه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه"**، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲ ، شماره ۵، از صفحه ۵۶۵ تا ۵۷۵.

[10] Benzer, A.H., Ergun, L.,Lynch, A. J., Oner, M., Gunlu, A., Celik, I.B., Aydogan, N.; 2001; "*Modelling cement grinding circuits";* Minerals Engineering, Vol. 14, No. 11, pp 1469-1482

[11] Ozer, C.E., Ergun, S. L., Benzer, A.H.; 2006; "*Modeling of the classification behavior of the diaphragms used in multi-chamber cement mills*"; International Journal of Mineral Processing, pp. 58-70

[۱۲] رستمی، شهامت؛ (۱۳۸۹)؛ **"تعیین پارامترهای عملیاتی و شبیه‌سازی فرآیند خردایش در آسیای اولیه واحد نیمه‌صنعتی مجتمع سنگ آهن گل گهر سیر**جان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان.

پی‌نوشت

[1] Grate discharge
[2] Latchireddi
[3] Morrel
[4] Exit classification
[5] Austin
[6] Cho
[7] Napier-Munn
[8] Bypass
[9] Numerical Grinding Optimization Tools in C
[10] BMCS-Based Modular Comminution Simulator
[11] Benzer