

اصلاح طراحی آسترهای دیواره ورودی و خروجی در آسیاهای خشک نیمه خودشکن مجتمع معدنی گل گهر

علیرضا حسنخویی^۱، مصطفی مالکی مقدم^۲، احسان ارغوانی^۳، امیر حاجی زاده^۴، محمد ابراهیم برزگر^۵، صمد بنیسی^{۶*}

- ۱- دانشجوی دکتری، مرکز تحقیقات کاشی گر، دانشگاه شهید باهنر، کرمان
- ۲- استاد فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان
- ۳- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، مرکز تحقیقات کاشی گر، کرمان
- ۴- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، شرکت معدنی و صنعتی گل گهر، کرمان
- ۵- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، شرکت گهر روش، سیرجان، کرمان
- ۶- استاد، گروه مهندسی معدنی، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

(دریافت ۱۳۹۸/۰۴/۳۱، پذیرش ۱۳۹۸/۰۸/۱۲)

چکیده

تاثیر آسترهای دیواره آسیاهای نیمه خودشکن خشک شرکت معدنی و صنعتی گل گهر بر حرکت بار درون آسیا و عملکرد خردایش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج دست آمده منجر به ارایه و نصب طرح جدیدی از این آسترها در آسیاهای کارخانه شد. در کارخانه فرآوری مگنتیت گل گهر برای خردایش اولیه سنگ معدن آهن، سه عدد آسیای نیمه خودشکن خشک (متر ۲/۵×۹) به صورت موازی به کار گرفته شده است. آزمایش‌های انجام شده در یک آسیای مدل کوچک مقیاس شده (قطر ۱ متر) نشان داد که آسترهای متفرق کننده در این آسیاها لزوماً بهترین شرایط خردایش را فراهم نمی‌کنند. به همین دلیل، یک طرح جدید که در آن از آسترهای کم ارتفاع تر به همراه آسترهای شعاعی استفاده شد، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور درک نحوه رفتار مواد داخل آسیا، مشاهدات حاصل از آزمایش در آسیای مدل، شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم افزار $KMPC_{DEM}$ و اطلاعات جمع آوری شده از آسیای صنعتی استفاده شد. نتایج نشان داد که آستر جدید با ارتفاع کم به همراه آسترهای شعاعی (با ارتفاع ۱۴/۵ سانتی متر در مقیاس صنعتی)، در محدوده افت فشار مجاز درون آسیا (۴۵-۴۰ میلی بار)، کارایی خردایش را افزایش داد. در طرح جدید در هر قطاع، تعداد آسترها از ۵ به ۴ و ضخامت آسترهای متفرق کننده درونی از ۴۵ به ۳۰ سانتی متر کاهش یافت و آستر متفرق کننده بیرونی با آسترهای شعاعی جایگزین شد. این کار باعث افزایش فاصله بین آسترهای دیواره ورودی و خروجی (طول موثر) آسیا به میزان ۵۳ درصد شد. در طرح جدید، وزن و حجم آسترهای دیواره به ترتیب به میزان ۹ و ۲۳ درصد کاهش یافت. با نصب آسترهای جدید، تناژ ورودی از ۴۴۱ به ۴۶۵ تن بر ساعت افزایش یافت، عمر آسترها نیز بین ۵۰ تا ۲۰۰ بهبود پیدا کرد و زمان تعویض آنها به میزان ۳۷/۵ درصد کمتر شد.

کلمات کلیدی

آسیاهای نیمه خودشکن خشک، سنگ آهن، آسترهای دیواره ورودی و خروجی، DEM، گل گهر.

۱- مقدمه

۱-۱- آسیای نیمه خودشکن خشک^۱

اولین بار در اواخر قرن ۱۸ میلادی به این واقعیت که می توان از برخورد مواد معدنی به یکدیگر در خردایش آنها استفاده کرد، اشاره شد. در ابتدا تصور بر این بود که از آسیاهای اولیه به منظور خردایش ماده معدنی تا رسیدن به اندازه محصول نهایی استفاده شود. اگر چه این کار با موفقیت‌هایی همراه بود، ولی در نهایت طراحان به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن آسیای گلوله‌ای کارآیی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد [۳۴]. در اوایل دهه ۳۰ میلادی، یک مهندس مکانیک در کالیفرنیا، ماشین خردایشی را معرفی کرد که می‌توانست به‌طور کامل جایگزین مدارهای سنگ‌شکن و آسیاهای سابق شود. مبنای طراحی او بر اساس خردایش سنگ با رهاکردن آن از ارتفاع بسیار زیاد در یک استوانه در حال چرخش بود [۳۵]. اولین آسیای خودشکن خشک در مقیاس صنعتی در سال ۱۹۵۴ و در معدن سنگ آهن "بنسن" آمریکا نصب و به کار گرفته شد. خیلی زود این روش جدید، رایج شد و معادن زیادی در آمریکا و کانادا و در ابعاد مختلف از آن استفاده کردند [۳۶]. آسیای نیمه‌خودشکن خشک، آسیایی است که در آن سیال حامل ذرات، هوا و نسبت طول به قطر آن، کمتر از آسیاهای تر معمولی است. مشخصه اصلی این آسیاها، آسترهای متفرق‌کننده گوه‌ای در دیواره ورودی و خروجی است. آسترهای این آسیاهای نیمه خودشکن شامل آسترهای متفرق‌کننده^۳ درونی و بیرونی در دیواره ورودی و خروجی آسیا و آسترهای بالابر^۴ در جداره آسیا است.

۱-۲- شرکت سنگ آهن گل گهر

این تحقیق در کارخانه فرآوری مگنتیت شرکت صنعتی و معدنی گل گهر انجام شد که در آن از سه آسیای نیمه خودشکن خشک به‌طور موازی و با ابعاد متر ۲/۵ × ۹ متر برای خردایش سنگ معدن ورودی (سانتی‌متر ۳۲ = F_{80}) تا رسیدن به ابعاد محصول (میکرومتر ۴۵۰ = P_{80}) استفاده می‌شود.

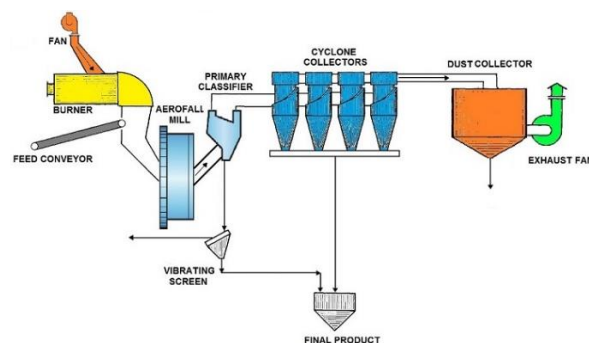
شکل ۱ نمای کلی مدار خردایش خشک را در کارخانه مگنتیت نشان می‌دهد.

توان هر آسیا برابر با ۳۰۰۰ کیلووات ساعت و سرعت چرخش آنها، ثابت و برابر با ۱۲ دور بر دقیقه (۸۵ درصد سرعت بحرانی) است. شکل ۲، نحوه قرارگیری آسترهای دیواره و جداره در این آسیاها را به تصویر می‌کشد. آسترهای دیواره از ۲۴ قطاع و آسترهای جداره از ۳۶ ردیف آستر بالابر^۴ تشکیل شده است. در طراحی اصلی آسترهای جداره، زاویه بالابری این آسترها

بخش خردایش در کارخانه‌های فرآوری مواد، همواره بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. این مساله بیشتر به‌واسطه استفاده از آسیاهایی است که ذاتا به دلیل غیرانتخابی بودن خردایش در آنها، کارایی پایینی دارند. استفاده از آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن در راستای کاهش هزینه‌ها و افزایش ظرفیت تولید کارخانه‌های فرآوری فراگیر شده است. ناکارآمدی استفاده از انرژی در خردایش و همچنین کاهش عیارحد در معادن، نیازمند بهبود مداوم کارآیی این فرآیند است [۲]. در این راستا، کارهای تحقیقاتی زیادی با محوریت بهبود فرآیند خردایش انجام شده است [۹-۳].

وظیفه اصلی آسترهای آسیا، محافظت از بدنه آسیا، انتقال انرژی به بار درون آسیا، محافظت از واسطه خردایش، فراهم کردن طبقه‌بندی داخلی آسیا و انتقال مواد خردشده به خارج از آسیا است [۱۰]. به‌همین دلیل، منطقی است که از میان عواملی که در کارآیی آسیا موثر هستند، آسترها کانون توجه بخش زیادی از تحقیقات قرارگیرند [۱۷-۱۱]. در پژوهش‌های انجام شده، نقش آسترهای جداره به‌خوبی مورد بررسی قرار گرفته شده اما در مورد آسترهای دیواره ورودی و خروجی آسیا (به‌خصوص در مورد آسیاهای خشک)، تعداد کارهای تحقیقاتی منتشرشده بسیار اندک است. در مورد آسترهای دیواره آسیاهای نیمه خودشکن خشک، عنوان شده است که این آسترها نقش مهمی در کارآیی آسیاکنی دارند [۱۸]. کارآیی خردایش، رابطه مستقیمی با نحوه رفتار بار درون آسیا دارد و فراهم کردن ارتفاع و مسیر مناسب برای حرکت بار از عوامل مهم در بهینه‌سازی فرآیند خردایش هستند [۱۹، ۲۰]. از آنجا که طرح آسترها نقش اصلی را در هدایت بار داخل آسیا ایفا می‌کند، یک طرح ضعیف با گذاشتن تاثیر منفی روی کارآیی خردایش و عمر آسترها باعث تحمیل هزینه و از دست رفتن سود حاصل از تولید می‌شود [۲۱]. اهدافی که به دنبال اصلاح طراحی آسترها هستند، شامل افزایش کارآیی خردایش، پیشینه‌شدن تناژ تولیدی، افزایش عمر آسترها و کاهش زمان توقفات ناشی از تعویض آسترهای آسیا است [۲۲]. در سال‌های اخیر، مدل‌سازی فیزیکی (که با ابزارهای مشاهده بصری پیشرفته و سنسورهای مختلف همراه شده است)، نرم‌افزار شبیه‌سازی حرکت ذرات (DEM) و ابزارهای اندازه‌گیری سه‌بعدی سایش، کمک‌های زیادی به مطالعه و بررسی کامل رفتار بار داخل آسیا کرده‌اند [۲۳-۲۳].

هم‌چنین همگن‌سازی ناقص، کارایی آسیا (تناژ) همواره کمتر از میزان هدف طراحی (ساعت/تن ۷۰۰-۴۰۰) بود. ناتوانی آسیاها در خردایش تا ابعاد طراحی (میکرومتر = ۴۵۰ P_{80})، مدار خردایش را به یک گلوگاه در کارخانه مگنتیت تبدیل کرده بود. به‌منظور بهبود کارایی خردایش آسیاها بدون اعمال هزینه‌های زیاد، استراتژی تغییر طرح آسترها انتخاب شد. در یک پژوهش برای اضافه کردن گلوله به آسیاهایی که به‌دلیل صدمه‌زدن به پوسته آسیا حذف شده بودند، زاویه بالابری آسترهای بالابرنده جداره از ۷ به ۳۰ درجه تغییر پیدا کرد [۱۶]. نتایج حاصل از این تغییر، افزایش ۱۹ تا ۲۶ درصدی تناژ ورودی به آسیا با دانه‌بندی خروجی یکسان بود [۱۵].



شکل ۱: مدار خردایش خشک آسیای نیمه خودشکن کارخانه مگنتیت [۳۷]

۳-۱- برنامه بهبود طرح آسترهای دیواره ورودی و خروجی

براساس دستورالعمل‌های آسیاهای نیمه خودشکن خشک [۳۸-۴۰]، آسترهای متفرق‌کننده گوه‌ای، نقش متمایزی در مقایسه با آسیاهای نیمه خودشکن تر دارند. عنوان شده است که این آسترها عمل "قفل‌شدگی ذرات" را در آسیا فراهم می‌کنند که تاثیر بسیار زیادی بر کارایی آسیا دارد [۳۸]. عمل قفل‌شدگی ذرات عبارت از تاثیری است که آسترهای متفرق‌کننده در بالابری ذرات دارند. این آسترها چون در دیواره دو طرف آسیا قرار دارند (شکل ۱)، باعث می‌شوند ذرات درشت و ریز در همدیگر قفل شوند و به ارتفاع بالاتری از شانه بار بروند. به‌منظور ارزیابی این ادعا، تصمیم به مدل‌سازی فیزیکی، شبیه‌سازی نرم‌افزاری و انجام آزمایش‌های ردیابی مسیر حرکت ذرات گرفته شد. حداقل یک تجربه صنعتی در مورد اینکه شاید نقش این آسترها آن‌گونه که ادعا می‌شود، حیاتی نیست، گزارش شده است [۱۸]. این موضوع باعث شد تا برنامه‌ای برای بهبود طرح آسترهای دیواره ورودی و خروجی شکل گیرد.

برنامه تغییر آسترهای دیواره ورودی و خروجی با در نظر گرفتن سه معیار زیر آغاز شد:

– فراهم کردن حجم موثر بیشتری برای آسیا به منظور

کارایی آسیاکنی بالاتر

– افزایش طول عمر آسترها با هدف افزایش زمان دسترسی

آسیا، کاهش توقفات و هزینه‌های تعویض آستر

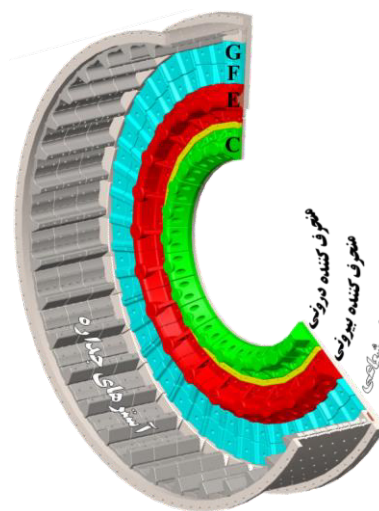
– در نظر گرفتن تمام جنبه‌های مکانیکی طرح برای

جلوگیری از صدمه به آسیا، آستر و گلوله‌ها

هدف از این تحقیق، در مرحله اول شناخت کامل و ارزیابی

نقش آسترهای دیواره ورودی و خروجی آسیا در کارایی آسیا

و تاثیر آنها در مسیر حرکت ذرات است. در راستای رسیدن به



شکل ۲: مدل سه بعدی آسیای نیمه خودشکن گل‌گهر [۳۷]

۷درجه بود که باعث صدمات جدی به پوسته آسیا شد. در ادامه، پژوهشی در مورد زاویه مناسب بالابری برای این آسترها انجام و در نهایت، زاویه ۳۰درجه انتخاب و آسترهای جدید با این مشخصات نصب شد و نتایج مطلوبی به‌دست آمد [۱۶]. در دیواره ورودی و خروجی آسیا، سه نوع آستر مورد استفاده قرار گرفته است که دو نوع آن، آسترهای متفرق‌کننده (E و C) و یک نوع، آسترهای شعاعی (G و F) هستند. با چرخش آسیا، مواد توسط آسترهای بالابرنده جداره به نقطه‌ای که شانه بار نامیده می‌شود، بالا برده می‌شوند. سپس، مواد در حال سقوط با برخورد به آسترهای متفرق‌کننده، به بخش میانی آسیا (در طول آسیا) هدایت می‌شوند.

به‌دلیل نوسان زیاد در خصوصیت‌های مربوط به خوراک ورودی به کارخانه (شامل کانی‌شناسی، سختی و اندازه) و

این هدف، از شبیه‌سازی‌هایی بر اساس روش اجزای گسسته (DEM) به همراه مدل‌سازی فیزیکی در آسیای مدل و داده‌های تکمیلی از شرایط آسیای صنعتی استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل، با نیل به افزایش کارایی آسیا به دنبال افزایش میزان برخوردی موثر در آسیا (ضرباتی از گلوله‌ها و ذرات که در خردایش موثر هستند) و افزایش عمر آسترها، طرح جدیدی برای آسترهای دیواره ورودی و خروجی آسیاهای نیمه‌خودشکن شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، ارایه و نصب شد.

۲- روش تحقیق

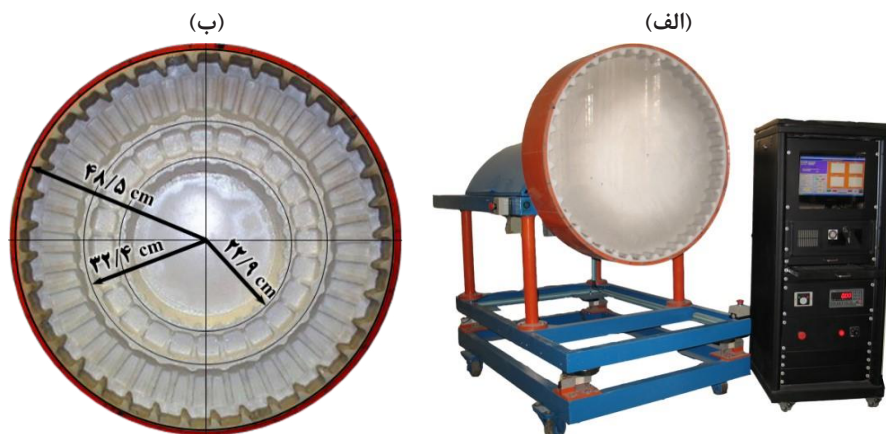
فرآیند طراحی جدید آسترهای دیواره ورودی و خروجی با ارزیابی آسترهای طرح اصلی آغاز و سپس، اصلاحات مختلف در طرح آسترها انجام شد تا در نهایت آستر با طرح جدید که تمام خواسته‌ها را برآورده می‌کرد، آماده شد. برای بررسی و تایید آسترهای گوه‌ای در رفتار بار درون آسیا، یک نمونه کوچک مقیاس شده از این آسترها، ساخته و در آسیای مدل نصب شد. به منظور درک بهتر فرآیند خردایش و بررسی نحوه رفتار ذرات درون آسیا، اندازه‌گیری‌های مستقیم از آسیای مدل به همراه شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار $KMPC_{DEM}$ ، مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام تمام آزمایش‌های مورد نیاز و اعمال اصلاحات و نهایی شدن طرح آسترها، نقشه‌های صنعتی آنها رسم و برای ساخت ارایه شد.

۲-۱- آسیای مدل

در مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر (KMPC)، از یک روش مدل‌سازی فیزیکی برای مدل‌کردن حرکت ذرات داخل

۲-۲- شبیه‌سازی براساس روش اجزای گسسته (DEM)

به منظور شبیه‌سازی رفتار بار درون آسیا در شرایط مختلف از نرم‌افزار بومی $KMPC_{DEM}$ استفاده شد که کار توسعه آن از سال ۱۳۹۲ در مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر آغاز شده بود. بومی بودن این نرم‌افزار و دسترسی کامل به کدهای آن، امکان هرگونه توسعه و استفاده از آن را فراهم کرده است [۴۱]. شبیه‌سازی نرم‌افزاری حرکت ذرات درون آسیا و مدل‌سازی فیزیکی آسیا، امکان شناخت کامل تاثیر هندسه‌های مختلف آستر در چگونگی رفتار بار درون آسیا را فراهم می‌کند. شبیه‌سازی رفتار بار با طراحی‌های مختلف آستر، می‌تواند به یافتن ترکیب آستر مناسب کمک کند. اطلاعاتی که از مقایسه طرح‌های پیشنهادی و طرح اصلی آستر به دست می‌آید، طرح



شکل ۳: الف) آسیای مدل و ابزارهای جمع‌آوری اطلاعات، ب) آسترهای جداره و دیواره کوچک مقیاس شده

مناسب و نهایی را برای آستر مشخص می‌کند.

۲-۳- ابزارهای جمع‌آوری داده‌های بصری

در شبیه‌سازی فیزیکی با آسیای مدل، پایش حرکت ذرات درون آسیا به‌وسیله دیواره شفاف انتهایی آسیا صورت گرفت. اصلی‌ترین مرحله در انجام آزمایش‌ها، ثبت و اندازه‌گیری نحوه توزیع ذرات و چگونگی حرکت بار در آسیا بود. آزمایش‌ها با چیدمان و طرح‌های مختلف آسترها انجام شد. بار درون آسیا شامل گلوله‌هایی با اندازه‌های مختلف ۴ تا ۱۲٫۵ میلی‌متر بود. حرکت بار با استفاده از دوربین فیلم‌برداری سرعت بالا (۲۴۰ fps) ثبت و با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر ImageJ تحلیل شد. در طول این تحقیق، روش‌های جدید برای درک بهتر حرکت و شرایط بار درون آسیا معرفی و استفاده شدند که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲-۳-۱- سیستم رهگیری ذرات با اندازه‌های مختلف

رهگیری ابعاد مختلف ذرات در مسیر حرکت آنها، نقش کلیدی در مطالعه رفتار حرکت بار دارد. در این روش با استفاده از دوربین‌های عکس‌برداری و فیلم‌برداری سرعت بالا، به‌طور مداوم مسیر حرکت و تجمع ذرات با ابعاد مختلف، مورد پایش و رهگیری قرار می‌گیرد. رهگیری ابعاد مختلف ذرات در مسیر حرکت آنها، نقشی کلیدی در مطالعه رفتار حرکت بار دارد. تعیین مسیر حرکت ذرات با اندازه مختلف، کمک زیادی به مشخص شدن محدودیت‌های آسترها با طرح‌های پیشنهادی می‌کند.

۲-۳-۲- رهگیری ذرات با رنگ فلورسنت در معرض نور فرابنفش

در این تحقیق با هدف بررسی نحوه رفتار ذرات با اندازه‌های مختلف در داخل آسیا، روشی جدید برای رهگیری ذرات معرفی و استفاده شد. اساس این روش بر پایه تشخیص و دنبال کردن ذرات با رنگ‌های مختلف فلورسنت در نور فرابنفش است. پروژکتور فرابنفش در مقابل آسیا قرار داده می‌شود و سپس از حرکت ذرات فلورسنت در آسیا که به صورت خطوط روشن در زمینه‌ای تاریک مشخص هستند، تصویربرداری صورت می‌گیرد.

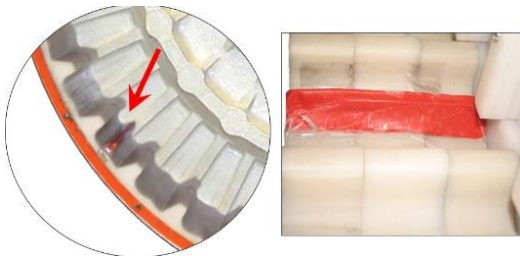
۲-۳-۳- حرکت آهسته ذرات با استفاده از استروبوسکوپ

چرخش نما یا استروبوسکوپ، ابزاری است که اجسام دارای حرکت تکراری را، به شکل حرکت آهسته یا به‌نظر ساکن نشان می‌دهد. از این ابزار برای مشاهده جزئیات بار و بررسی حرکت

آن استفاده شد. با تنظیم فرکانس دستگاه، بار در حال سقوط به آسیای در حال چرخش، به شکل ثابت و یا دارای حرکت آهسته در می‌آید. این در حالی است که حرکت ذرات در نور معمولی به سختی قابل تشخیص است و بیشتر به‌صورت خط سیری از حرکت ذرات دیده می‌شود.

۲-۳-۴- بررسی چگونگی توزیع برخورد ذرات در طول آسیا

فرآیند خردایش درون آسیا حاصل دو عمل اصلی خردکنی، یعنی ضربه و سایش است. ذراتی که در بخش پاشنه بار قرار می‌گیرند، در معرض بیشترین ضربات حاصل از ذرات و گلوله‌های در حال سقوط هستند. از آن‌جاکه این ذرات بیشترین سهم را در فراهم کردن خردایش با روش ضربه در آسیا به‌عهده دارند، تعداد این برخوردها در طول آسیا (که انرژی بالایی نیز دارند) از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش برای بررسی و کمی‌کردن میزان ضربات در طول آسیا از خمیری که در طول آسیای مدل قرار داده شده بود، استفاده شد (شکل ۴). میزان تغییر فرم این خمیر پس از انجام آزمایش، نمایشی از چگونگی توزیع ضربه‌های ذرات و گلوله‌ها در طول آسیا است.



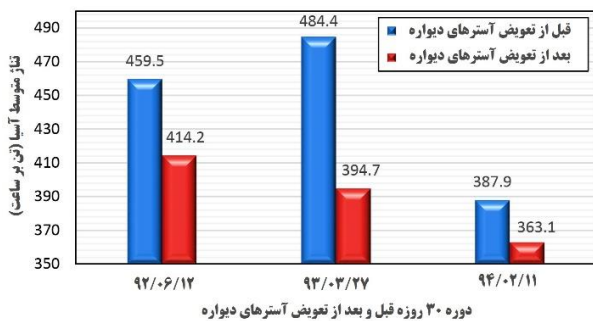
شکل ۴: خمیر قرار داده شده در طول آسیا (قرمز رنگ)

۲-۴- شرایط و مشخصات آزمایش‌ها

شاخص‌های عملیاتی مورد استفاده در تمامی آزمایش‌ها در جدول ۱، آورده شده است.

اولین مجموعه از آزمایش‌های ارزیابی آسترها با بررسی مسیر حرکت بار انجام گرفت و داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری شد. در مرحله بعدی براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، اصلاحاتی در طرح آسترها صورت گرفت و آسترهایی با طرح جدید، ساخته و در آسیای مدل نصب و سپس آزمایش‌ها با شرایط قبل تکرار شد (شکل ۵).

ورودی به آسیا بود. این مقایسه برای سال‌های ۹۲، ۹۳ و ۹۴ صورت گرفت (شکل ۶). در هر سه دوره، پس از نصب آسترهای نو در دیواره، کاهش مشخصی در تناژ ورودی به آسیا مشاهده شد. این نتایج، اطلاعات کلیدی را برای طرح جدید آسترها فراهم کرد و مشخص شد که آسترهای بیرونی گوه‌ای شکل دیواره ورودی و خروجی باعث کاهش تناژ ورودی به آسیا در ابتدای نصب آنها می‌شوند، ولی با ساییده شدن این آسترها، تناژ افزایش می‌یابد. دلیل این مساله را می‌توان، تاثیر این آسترها در کاهش طول موثر آسیا دانست.



شکل ۶: مقایسه تناژ ورودی آسیا در دوره‌های ۳۰ روزه قبل و بعد از تعویض آسترهای گوه‌ای بیرونی

۳-۲- ارزیابی رفتار بار درون آسیا با آسترهای دیواره طرح اصلی مطرح است که طرح آسترهای دیواره بر کارایی خریدایش، نرخ سایش و عمل فیل شدن ذرات تاثیر مستقیمی دارد [۴۰]. براساس این فرضیه، آسترهای دیواره، کارایی خریدایش را با فراهم کردن یک نیروی بالابر مناسب برای ذرات، بهبود می‌دهند. برای مشخص کردن نکات منفی در طرح این نوع از آسترها و در نهایت دست‌یافتن به بهترین طرح جایگزین، در ادامه نتایج بررسی نحوه رفتار بار درون آسیا، مورد بحث قرار می‌گیرد.

در مدل‌سازی فیزیکی، این محدودیت وجود دارد که تنها تنها، بخش جلویی بار در سمت شیشه شفاف جلوی آسیا قابل مشاهده است. با شبیه‌سازی‌های EDM و رهگیری ذرات در نور فرابنفش، این محدودیت از مطالعه رفتار بار حذف شد. در این شرایط، سطح مقطع بار درون آسیا (شکل ۷) را می‌توان به سه ناحیه اصلی بار توده‌ای، بخش آبشاری (بار از هم باز شده در پرواز) و بخش حمل شده توسط آسترها تقسیم‌بندی کرد. بخش توده‌ای بار، هلالی شکل است. در این هلال، ذرات نزدیک به

جدول ۱: شاخص‌های عملیاتی مورد استفاده در آزمایش‌ها

متغیرها	مقادیر
اندازه گلوله‌ها (میلیمتر)	۴-۱۲٫۵
سرعت چرخش آسیا (% سرعت بحرانی)	۸۵
پرشدهی آسیا (/)	۲۴
زاویه بالابری آسترهای جداره (درجه)	۳۰



شکل ۵: آسترهای طرح جدید نصب شده در آسیا

۲-۵- اندازه‌گیری سه‌بعدی پروفیل سایش آسترها

اسکن سه‌بعدی آسترها در طول عمر کاری آنها، امکان بررسی دقیق نحوه سایش و برداشت سریع اطلاعات (بین ۱۵ تا ۳۰ دقیقه) در توقف‌ها را فراهم می‌کند. برای این منظور از یک اسکنر سه‌بعدی با قابلیت برداشت قطعات مختلف آستر بدون نیاز به نقطه مرجع استفاده شد. داده‌های ابری برداشت شده از نقاط و خطوط مش‌بندی شده، تصویری سه‌بعدی با تمام جزئیات از آسترها ارائه داد. اطلاعات مربوط، برای تحلیل و ثبت روند سایشی آسترهای طرح اصلی و طرح جدید و در نظر گرفتن موارد مهم در طراحی این آسترها به کار گرفته شد.

۳-۳- ارزیابی یافته‌ها و تحلیل نتایج

۳-۱- بررسی تاثیر این آسترها بر کارایی خریدایش در آسیای صنعتی

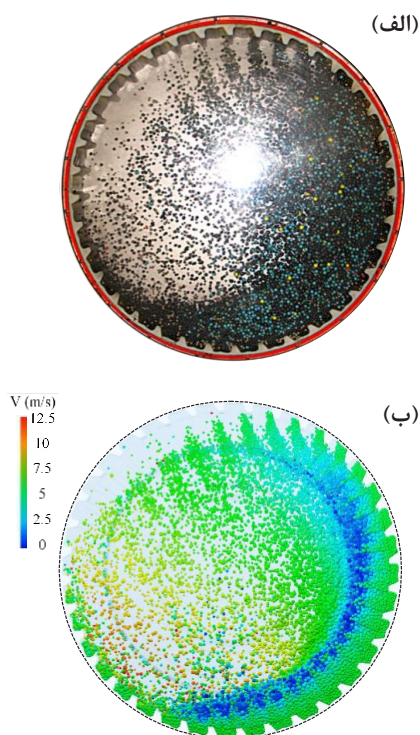
به منظور بررسی تاثیر این آسترها بر کارایی خریدایش، متوسط تناژ ورودی به آسیا در سه دوره ۳۰ روزه، قبل و بعد از تعویض آسترها مقایسه شدند. هدف از این مقایسه، یافتن هرگونه رابطه معنی‌دار بین آسترهای ساییده شده و نو با تناژ

با فراهم کردن عمل قفل شدگی ذرات ریز و درشت، تاثیر این آسترها در حرکت ذرات با مقایسه دو حالت وجود و عدم وجود آسترهای گوه‌ای در آسیا مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۸). همان‌گونه شکل ۸-ب نشان می‌دهد، وقتی آسترهای دیواره در آسیا وجود ندارند، بخش توده‌ای ذرات، متراکم‌تر است ولی در هنگامی که آسترهای دیواره طرح اصلی در آسیا نصب شده‌اند، هلال بار توده‌ای، کشیده‌تر شده و ذرات در پشت آسترهای گوه‌ای بیرونی، نگه داشته و در چرخش آسیا، مواد بالاتر رفته و به بخش در پرواز بار وارد می‌شوند.

مشخصه دیگر این آسترها، پخش کردن مواد در حال سقوط و در معرض جریان هوا قرار دادن ذرات است که در نهایت به خروج ذرات ریز از داخل آسیا کمک می‌کند.

۳-۲-۲- بررسی عملکرد هوا در آسیای خشک

در آسیاهای نیمه خودشکن خشک، ذرات ریز توسط جریان هوا از آسیا خارج می‌شوند. برای جلوگیری از افت فشار نامطلوب در طول آسیا باید سرعت هوا درون آسیا در حد مشخصی (ثانیه/متر 24.83 براساس داده‌های طراحی آسیا)



شکل ۸: حرکت ذرات در آسیا الف) عدم وجود آسترهای دیواره، ب) وجود آسترهای دیواره طرح اصلی (شبیه‌سازی شده با $KMPC_{DEM}$)

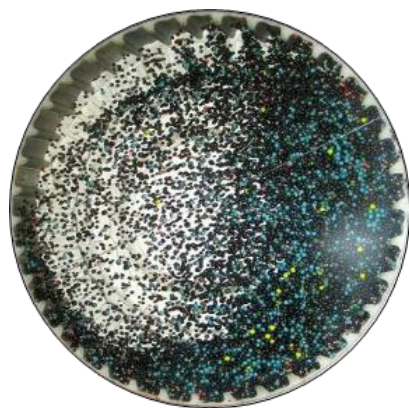
جداره آسیا به سمت بالا حرکت می‌کنند تا به نقطه‌ای برسند که در آن نقطه، نیروی گرانش بر نیروی گریز از مرکز غلبه می‌کند. در این نقطه که اصطلاحاً به "شانه بار" معروف است، ذرات شروع به سقوط می‌کنند. بخشی از ذرات در همان بخش هلالی شکل بر روی ذرات دیگر می‌غلطند. این ذرات در بخش توده‌ای، حرکتی گردشی در حول نقطه "مرکز گردش" انجام می‌دهند. بخش دیگر ذرات در حال سقوط، در محدوده‌ای بین شانه بار و نقطه‌ای در بالاتر که نقطه "سر بار" گفته می‌شود، به حرکت پرتابی وارد می‌شوند. این ذرات، بار در پرواز را تشکیل می‌دهند. بار در پرواز به سهمی از ذرات اطلاق می‌شود که هنگام چرخش آسیا، در حالت حرکت و بدون تماس با یکدیگر هستند و یا اگر با هم ذرات تماس دارند، این تماس نه از نوع برخورد بلکه تماس در جریان همراهی است [۴۲]. تمامی ذراتی که در حال حرکت رو به پایین هستند، در نقطه‌ای که به آن "پاشنه برخورد" گفته می‌شود، شروع به برخورد با بدنه آسیا و در محدوده پایین‌تر با بستر بار می‌کنند. شروع هلال بار توده‌ای از نقطه‌ای که "پاشنه بار توده‌ای" نامیده می‌شود، بستر بار را شکل می‌دهد.

۳-۲-۱- بررسی عمل قفل شدگی ذرات در آسیای نیمه خودشکن خشک

در ادامه بررسی مطالب عنوان شده از طرف طراحان [۴۰، ۳۷] در رابطه با نقش این آسترها در بالابری بیشتر ذرات



شکل ۷: نمایش حرکت بار در آسیای نیمه خودشکن خشک با آسترهای دیواره طرح اصلی ول آسیا (قرمز رنگ)



شکل ۹: حرکت بار در داخل آسیا با آسترهای دیواره طرح اولیه

با DEM از حرکت بار درون آسیا (شکل ۱۰-ب) تجمع ذرات درشت در بخش مرکزی بار در حال چرخش کاملاً مشخص است (رنگ‌ها نشان‌دهنده اندازه‌های مختلف ذرات است).

۳-۲-۴- تعیین طول موثر آسیا در حضور آسترهای دیواره با طرح اصلی

انرژی برخورد، به مقدار کاری اطلاق می‌شود که توسط گلوله‌ها، هنگام برخورد به بار صورت می‌گیرد. این انرژی، متناسب با قطر گلوله‌ها و ارتفاع سقوط آنها است. با آسترهای دیواره طرح اصلی، گلوله‌های بزرگ که در نزدیکی چشم بار (مرکز چرخش ذرات) قرار گرفته‌اند، انرژی ضربه‌ای کمی دارند. برای بهبود کارایی خردایش، هم گلوله‌های بزرگ باید به سمت ناحیه آبشاری بزرگ منتقل شوند تا انرژی بیشتری را در برخورد با بار فراهم کنند و هم طولی که این ذرات در حال سقوط بر روی بستر بار هستند باید تا حد امکان افزایش پیدا کند.

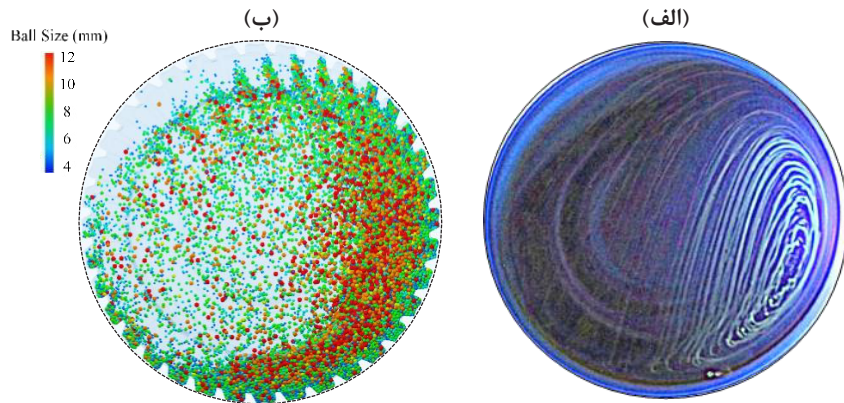
حجم موثر آسیا، آن حجمی از استوانه آسیا است که قطری، معادل قطر داخل آسترهای جداره و طولی، معادل با طول داخل آسترهای دیواره دارد [۲۴]. این حجم موثر آسیا در واقع، حجمی است که فرآیند خردایش می‌تواند در آن به صورت موثر اتفاق بیافتد. در آسیای نیمه خودشکن خشک، فاصله بین دو آستر گوه‌ای بیرونی در ورودی و خروجی، می‌تواند نشان‌دهنده طول موثر آسیا باشد. بنابراین اگر طول آسیا، ۲۰۵ سانتی‌متر و ارتفاع هر کدام از آسترهای گوه‌ای ۴۵ سانتی‌متر باشد، طول موثر خردایش در آسیای نیمه خودشکن کارخانه مگنتیت ۱۱۵ سانتی‌متر خواهد بود که برابر ۵۶ درصد طول کلی آسیا است. شکل ۱۱، نمایشی سه‌بعدی از طول موثر در این آسیا را نشان می‌دهد.

نگه داشته شود. برای حفظ سرعت مناسب جریان هوا، افت فشار درون آسیا نباید از حد مشخصی کمتر شود. ضخامت پرده مواد در حال سقوط و نحوه توزیع ذرات در طول آسیا، دو عامل بسیار مهم در افت فشار است. آسترهای گوه‌ای در دو انتهای آسیا بر این عوامل تاثیر می‌گذارند و در نهایت میزان افت فشار در طول آسیا را تعیین می‌کنند. بیشترین سرعت جریان هوا به بخش داخلی آسترهای گوه‌ای مربوط می‌شود. این الگوی جریان هوا سرعت مورد نیاز برای خروج ذرات ریز را از آسیا فراهم می‌کند. این امر به‌طور ضمنی، نشان می‌دهد وقتی قطر آسترهای گوه‌ای داخلی تغییری نکند، افت فشار کافی برای خروج ذرات فراهم می‌شود. ضمناً بررسی داده‌های کارخانه در انتهای عمر آسترهای گوه‌ای داخلی نشان داد، زمانی که یک سوم ارتفاع این آسترها ساییده شده بود، تغییر بارزی در افت فشار در طول آسیا مشاهده نشد. این اطلاعات کلیدی، راهنمایی برای تغییر مناسب ارتفاع در آسترهای گوه‌ای داخلی را فراهم کرد.

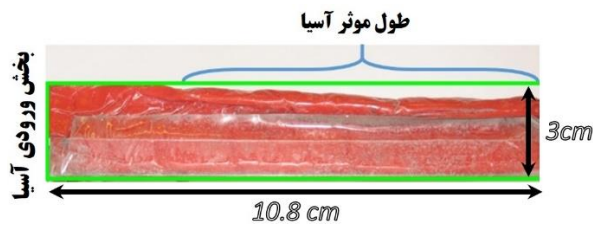
۳-۲-۳- جدانشینی شعاعی ذرات در آسیا

از مواردی که در فرآیند خردایش معمولاً تاثیر منفی دارد، جدانشینی شعاعی در آسیای گردان است که در نتیجه تفاوت در اندازه، شکل و دانسیته ذرات رخ می‌دهد. همچنین متغیرهای طراحی و عملیاتی آسترهای آسیا نیز می‌توانند در جدانشینی ذرات تاثیرگذار باشند. جدانشینی مواد، اغلب باعث کاهش کیفیت محصول آسیاکنی و کارایی خردایش می‌شود. در راستای حذف این جدانشینی، فهم کامل تاثیر مواد، طرح آستر و شرایط عملیاتی حایز اهمیت است. شکل ۹، حرکت بار درون آسیای خشک با آسترهای طرح اولیه را نشان می‌دهد. طراحی خاص آسترهای گوه‌ای، باعث می‌شود که ذرات به صورت متراکم در بخش توده‌ای بار جمع شوند. همان‌گونه که مشخص است آسترهای گوه‌ای، مواد را در محفظه‌ای بین آسترهای گوه‌ای بیرونی و آسترهای جداره نگه می‌دارند.

یک روش ساده برای کمی‌کردن و قابل مشاهده کردن مقدار جدانشینی ذرات در طرح اصلی آسترها، رنگ‌آمیزی ذرات با اندازه‌های مختلف با استفاده از رنگ‌های فلورسنت و رهگیری این ذرات در نور ماورابنفش است. در شکل ۱۰-الف، مسیر حرکت ذرات درشت (۱۲ میلی‌متر) به رنگ سبز و ذرات ریز (۵ میلی‌متر) به رنگ قرمز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گلوله‌های درشت به مرکز بار نزدیک‌تر هستند و گلوله‌های ریز در محدوده آبشاری قرار گرفته‌اند. در شبیه‌سازی



شکل ۱۰: تصویر مسیر حرکت ذرات (الف) در زیر نور ماورا بنفش، (ب) با استفاده از شبیه‌سازی با DEM



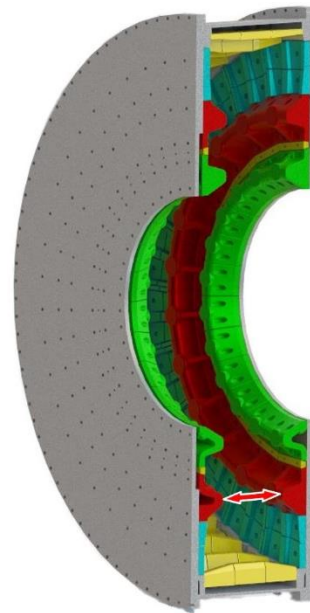
شکل ۱۲: تغییر شکل خمیر در طول آسیای مدل

مانند نیمه ابتدایی آسیا باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ۱۵ درصد ابتدایی طول آسیا، تحت محافظت آسترهای گوه‌ای قرار دارد و هیچ‌گونه تغییر شکلی نداشته است. این یعنی تقریباً در ۳۰ درصد طول آسیا، فرایند خردایش موثری وجود ندارد و ضربات گلوله‌های در حال سقوط، با برخورد به آسترهای گوه‌ای تلف می‌شوند.

۳-۲-۵- الگوی سایش در آسترهای دیواره با طرح اصلی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، یکی از وظایف آسترها محافظت از پوسته جداره دیواره آسیا است [۱۲]. برخورد مستقیم بار و گلوله‌ها با آسترها، هیچ‌گاه مطلوب نیست. براساس آزمایش‌ها مشخص شد که به دلیل طراحی خاص آسترهای گوه‌ای، بخشی از ضربات ذرات و گلوله‌ها به‌طور مستقیم به آسترها برخورد می‌کند که در نهایت باعث کاهش کارایی خردایش و سایش بیش از حد آسترها می‌شوند.

از این‌رو تصمیم گرفته شد با اصلاح طرح این آسترها، ضربات به‌جای آستر، به بار برخورد کنند. هدف، فراهم آوردن روش‌های ضربه‌ای و سایشی در نسبت‌های مناسب و با توجه به خصوصیات سنگ معدن و اهداف عملیاتی بود. برنامه‌ای



شکل ۱۱: طول موثر در آسیای نیمه خودشکن خشک (فلش قرمز رنگ)

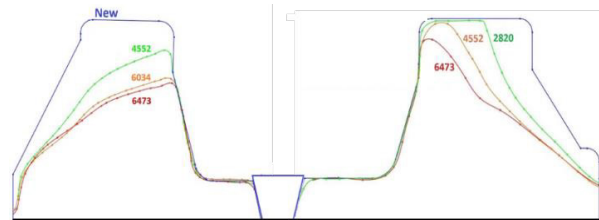
برای تعیین طول موثر آسیا، یک خمیر در طول آسیا در بین آسترهای جداره نصب شد و سپس آسیا طبق شرایط عملیاتی معمول، شروع به کار کرد. هدف اصلی این بود، منطقه‌ای از طول آسیا که توسط گلوله‌ها مورد ضربه قرار می‌گیرد، مشخص شود. نکته مهم آن است که به دلیل ضخامت آسترهای گوه‌ای بیرونی، بخشی از طول آسیا در معرض ضربات گلوله‌ها قرار نمی‌گیرند. شکل ۱۲، نتایج حاصله از قراردادن خمیر را در آسیا نشان می‌دهد. از آنجایی که مدل‌سازی تنها نصف آسیا را شامل می‌شود، با توجه به شباهت طرح آسترها در دو نیمه ورودی و خروجی، انتظار می‌رود تغییرات در نیمه دوم نیز

ضخامت پرده مواد در معرض جریان هوا در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، افزایش این فاصله هم با افزایش طول موثر در آسیا، باعث بهبود کارایی آسیاکنی می‌شود و هم موجب پخش شدن مواد و بهتر در معرض هوا قرار گرفتن ذرات خردشده می‌شود. اما به دلیل افت فشار، برای این افزایش یک حد وجود دارد. اطلاعات به دست آمده از کارخانه نشان داد که در انتهای عمر آسترهای گوه‌ای درونی، یعنی زمانی که هنوز دو سوم از ارتفاع این آسترها باقی مانده، تغییری در افت فشار در طول آسیا مشاهده گزارش نشده است. این موضوع، دید روشنی در رابطه با ارتفاع مناسب این آسترها و چگونگی طراحی آن داد. به همین دلیل، ضخامت این آسترها از ۴۵۰ به ۳۰۰ میلی‌متر یعنی دو سوم ارتفاع قبل، کاهش یافت و با افزایش پهنای آستر، طراحی به گونه‌ای انجام شد که با توجه به الگوی سایش این آسترها، ارتفاع آن حداقل کاهش را داشته باشد. این کاهش ارتفاع در آسترهای گوه‌ای درونی، باعث شد تا فاصله بین دهانه خروجی و ورودی آسیا از ۱۱۵۰ به ۱۴۵۰ میلی‌متر یعنی ۲۶ درصد افزایش یابد.

با توجه به تاثیر منفی طرح اصلی آسترهای گوه‌ای بیرونی در عملکرد خردایش درون آسیا، نکته اصلی در اصلاح طرح آنها استفاده از آسترهای با ارتفاع کمتر بود. بنابراین، تصمیم گرفته شد با توجه به امکان فراهم شدن بالابری توسط آسترهای شعاعی، به جای آسترهای گوه‌ای بیرونی طرح اصلی، از آسترهای شعاعی استفاده شود و آنها تا آسترهای گوه‌ای درونی، امتداد داده شوند. در راستای آماده‌سازی محیط مناسبی برای فرایند خردایش بهینه، تعیین ارتفاع آسترهای شعاعی را می‌توان از مهم‌ترین ملاحظات اولیه درباره این آسترها دانست. فراهم کردن بالابری مناسب برای ذرات، اولاً در جهت تامین خردایش ضربه‌ای مورد نیاز در آسیا و ثانیاً در معرض جریان هوا قراردادن مواد (به منظور خارج کردن ذرات خردشده از آسیا در اولین فرصت) از جمله هدف‌هایی است که برای این آسترهای شعاعی در نظر گرفته شد.

برای یافتن ارتفاع مناسب آسترهای شعاعی، انواع مختلف این آسترها با ارتفاع‌های ۶، ۱۱، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ میلی‌متر در آسیای مدل، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که رابطه مستقیمی بین ارتفاع این آسترها و میزان بالابری مواد وجود دارد. هدف، تعیین یک ارتفاع مناسب برای آسترهای شعاعی بود تا بالابری نزدیک به آسترهای گوه‌ای با طرح اصلی فراهم شود. در طرح اصلی، ارتفاع آسترهای شعاعی برابر با ۶ میلی‌متر بود. این ارتفاع از آسترهای شعاعی (شکل ۱۴- الف)،

پیوسته از پایش نحوه سایش آسترهای دیواره با طراحی اصلی در آسیای صنعتی، نتایج شکل ۱۳ را به دست داد. این الگوی سایش، مربوط به مقطع میانی یک قطاع از آسترهای گوه‌ای است.



شکل ۱۳: الگوی سایش در آسترهای دیواره با طرح اصلی پس از ۶۴۷۳ ساعت کارکرد آسیا (اعداد روی منحنی‌ها زمان کارکرد آسترها را بر اساس ساعت نشان می‌دهند)

میزان سایش در آستر گوه‌ای درونی دیواره ورودی، بسیار کم بود و براساس اطلاعات کارخانه، تقریباً عمری برابر با ۱۲ سال داشتند. اگرچه متوسط عمر این آسترها در دیواره خروجی آسیا، تنها ۵۸۰۰ ساعت بود. دلیل این میزان بالای سایش، جریان برگشتی از موادی است که توسط جریان هوا به داخل کانال خروجی کشیده می‌شوند ولی در نهایت به واسطه وزن خود، دوباره به داخل آسیا بازمی‌گردند. الگوی سایش در آسترهای گوه‌ای بیرونی، نشان می‌دهد که این آسترها کاملاً در مسیر جریان ذرات در حال سقوط قرار دارند. آسترهای گوه‌ای بیرونی، دارای وزن بسیار زیادی (۸۸۸ کیلوگرم) هستند و با توجه به محل دور از دسترس آنها، نصب‌شان کار بسیار سخت و زمان‌بری است. در طرح جدید آسترها این مساله نیز مدنظر قرار گرفت تا زمان نصب کاهش و ایمنی نصب، افزایش پیدا کند.

به دلیل برخورد مستقیم گلوله‌ها با این آسترها، جنس آسترها از آهن با آلیاژ مقاوم در برابر ضربه انتخاب شد. از آنجا که بین در برابر ضربه مقاوم بودن آلیاژ و سایش آن، رابطه عکس وجود دارد، عمر آسترها به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. تغییر طراحی این آسترها از ضخامت زیاد به ضخامت کمتر، امکان استفاده از آلیاژهای مقاوم در برابر سایش (فولادهای کروم‌دار) را فراهم می‌کند که باعث افزایش قابل توجه عمر آسترها می‌شود.

۳-۳- مشخصات طرح جدید آسترهای دیواره ورودی و خروجی

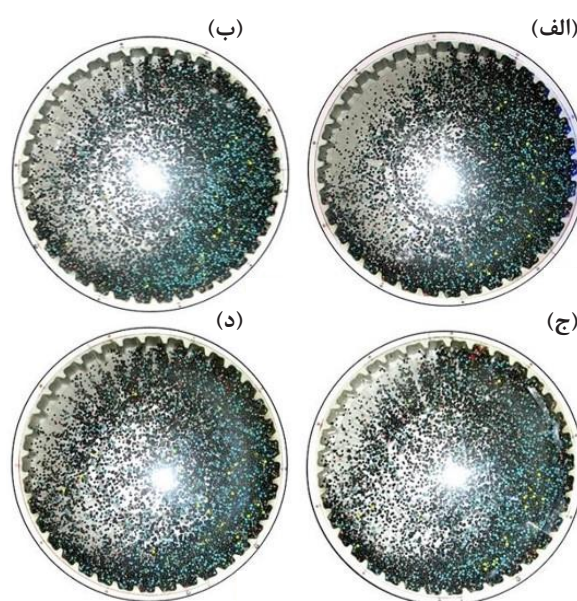
آسترهای گوه‌ای درونی در افت فشار در طول آسیا موثر هستند. فاصله بین این آسترها در ورودی و خروجی به‌عنوان

اولین نسخه طرح جدید آسترهای دیواره، یک حلقه از آسترهای درونی و شعاعی با ارتفاع مناسب بود (شکل ۱۵-الف). مدل سازی حرکت ذرات در آسیای مدل نشان داد که در هنگام چرخش آسیا، بخشی از مواد در فاصله کم ایجاد شده بین آسترهای شعاعی و نزدیک به آسترهای گوه‌ای درونی، گیر می‌کنند. این باعث می‌شد تا بخشی از مواد که باید در جریان هوای عبوری از آسیا سقوط کنند، سوار بر آسترها بچرخند.

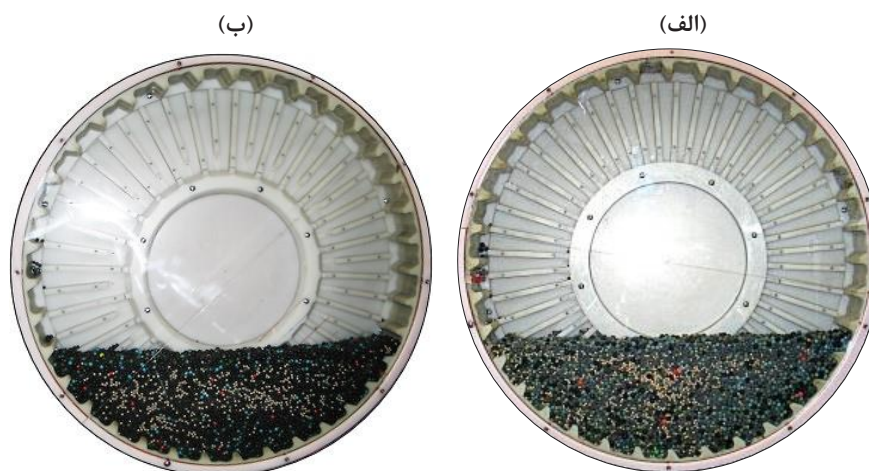
برای حل این مشکل، در قسمت نزدیک به آستر گوه‌ای درونی، آسترهای شعاعی به صورت یک در میان کوتاه شدند. در نتیجه این تغییر، مواد به طور کامل در مرکز سطح مقطع آسیا تخلیه می‌شوند. شکل ۱۵-ب نسخه نهایی آسترهای دیواره را نشان می‌دهد.

در طرح جدید آسترهای دیواره، علاوه بر اهداف فرایندی، نکاتی شامل کاهش تعداد قطعات، کاهش زمان تعویض و نصب آسترها، افزایش عمر مفید آنها و اطمینان از ایمنی فرایند تعویض و نصب نیز در نظر گرفته شدند. هم‌چنین در زمان طراحی، توجه ویژه‌ای نیز در رابطه با هم‌خوانی هندسی این آسترها با آسترهای جداره آسیا وجود داشت تا حدممکن از هرگونه تداخل بین آسترها با یکدیگر، در حین کار آسیا و یا در زمان تعویض جداگانه هر کدام از آسترها جلوگیری به عمل آید. قطعات باید به شکلی طراحی می‌شدند که کمترین زمان توقف را به خود اختصاص دهند. بنابراین، در مرحله اول تعداد آنها از ۵ به ۴ قطعه کاهش داده شد. تغییر طرح آسترهای دیواره، باعث شد تا وزن و حجم آسترها به ترتیب ۹ و ۲۳ درصد کاهش پیدا کند. با این وزن کمتر و الگوی ساده‌تر، علاوه بر

بالابری مدنظر را برای مواد فراهم نمی‌کرد. به منظور فراهم کردن بالابری کافی در طرح جدید، این ارتفاع باید افزایش پیدا می‌کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که ارتفاع بسیار زیاد این آسترها موجب حمل بیش از اندازه ذرات و سایش بالای آسترها می‌شود (شکل ۱۴-د). در نهایت میزان مناسب برای این ارتفاع، ۱۵/۵ میلی‌متر انتخاب شد که می‌توانست اهداف مورد نیاز برای این آسترها را تامین کند. در مقیاس صنعتی این ارتفاع برابر با ۱۴/۵ سانتی‌متر می‌شود (شکل ۱۴-ج).

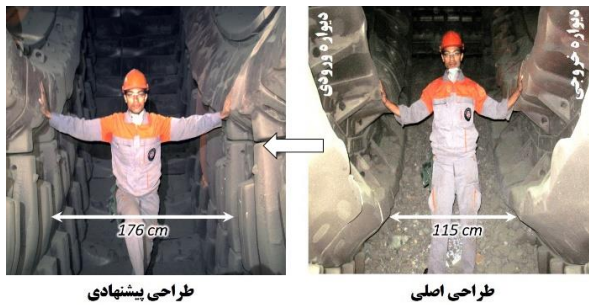


شکل ۱۴: رفتار بار در آسیای مدل با طرح‌های مختلف آسترهای شعاعی با ارتفاع به ترتیب الف) ۶، ب) ۱۱، ج) ۱۵/۵ و د) ۱۸/۵ میلی‌متر



شکل ۱۵: الف) اولین نسخه و ب) نسخه نهایی طراحی جدید برای آسترهای دیواره

بیرونی با آسترهای شعاعی، باعث شد طول موثر آسیا از ۱۱۵ به ۱۷۵ سانتی‌متر یعنی به میزان ۵۳ درصد افزایش یابد که به معنی فراهم شدن فضای بیشتری برای خردایش در آسیا است.



شکل ۱۷: مقایسه بین طول موثر در طرح اصلی و جدید آسترهای دیواره

۳-۴- ارزیابی آسترهای دیواره با طرح جدید

هدف از ارائه طرح جدید برای آسترهای دیواره، نخست حفظ مزیت‌های طرح اصلی یعنی فراهم کردن بالابری مناسب برای مواد و پخش کردن آنها در مقابل جریان هوای عبوری از داخل آسیا و دوم حل معایب مربوط به این آسترها بود.

معایب آسترهای دیواره با طرح اصلی عبارت بودند از: کاهش ۵۳ درصدی طول موثر خردایش، جدانشینی قابل توجه در ذرات (تجمع ذرات درشت در ناحیه مربوط به خردایش سایشی) و نرخ سایش بالای این آسترها (به دلیل برخورد مستقیم ذرات با آسترها). در مورد آسترهای با طرح اصلی و طرح جدید، چندین مقایسه درباره مسیر حرکت ذرات و توزیع آنها صورت گرفت.

۳-۴-۱- ارزیابی رفتار بار درون آسیا با آسترهای دیواره طرح جدید

مهم‌ترین جنبه در آسترهای با طرح جدید، شیوه حرکت بار درون آسیا است. براساس بررسی که در مورد طراحی اصلی آسترها انجام شد، سطح مقطع بار درون آسیا با طرح جدید آسترها را می‌توان به دو بخش بار توده‌ای و بار در پرواز تقسیم کرد. برای کمی کردن رفتار بار در آسیا نیز مشخصه‌هایی تعریف شدند. شکل ۱۸، نمایشی از حرکت بار درون این آسیا با آسترهای دیواره طرح جدید است.

ایمینی بالاتر در نصب آنها، مدت زمان لازم برای تعویض نیز به میزان ۳۷٫۵ درصد کمتر شد. تمامی موارد بالا، به همراه افزایش عمر در این آسترها، هدف اصلی کارخانه یعنی افزایش مدت زمان در دسترس بودن آسیای نیمه‌خودشکن را محقق کرد.

در نهایت نقشه‌های صنعتی طرح جدید (شکل ۱۶) ارائه و ساخته شد و این آسترها در دو آسیای نیمه‌خودشکن خشک کارخانه مگنتیت شرکت گل‌گهر نصب شدند. در اولین سری تعویض این آسترها، فرصت بررسی چگونگی عملکرد طراحی جدید در فرآیند خارج کردن آسترهای ساییده شده و نصب آسترهای نو فراهم شد. کارایی عملیات نصب و تعویض این آسترها، بسیار فراتر از انتظارات بود. آنها به راحتی در موقعیت نصب قرار می‌گرفتند و در ظرف چند دقیقه نصب می‌شدند. مدت زمان کلی لازم برای تعویض آسترها شامل خارج کردن آسترهای ساییده شده، انتقال این آسترها به خارج از آسیا، انتقال آسترهای نو به داخل آسیا، قراردادن و نصب آسترهای نو در موقعیت خود و چرخاندن آهسته آسیا است. به دلیل تعداد قطعات کمتر و طراحی خاص این آسترها، زمان کلی تعویض آستر برابر با ۶۲٫۵ درصد طرح قبلی شد. دلیل این موفقیت در همکاری نزدیک طراحان و اعضای تیم تعویض آستر در کارخانه هم‌زمان با طراحی آسترهای جدید بود.



شکل ۱۶: مدل سه بعدی آسیا با آسترهای طرح جدید دیواره

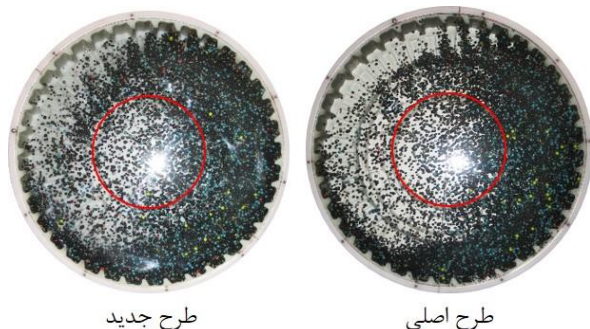
شکل ۱۷ به طور خلاصه آن‌چه در مورد این آسترها اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد. جایگزین کردن آسترهای گوه‌ای

۳-۴-۲- بررسی نحوه پخش شدن ذرات در مسیر جریان هوای عبوری از آسیا

یکی دیگر از موارد مهم در آسیاهای خشک، انتقال مواد خرد شده به بیرون از آسیا است. به همین دلیل در طرح جدید، میزان ذرات پخش شده در دهانه خروجی ذرات (دایره قرمز رنگ در شکل ۱۹) نباید تفاوتی با طرح اصلی داشته باشد. براساس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با DEM، مقدار حجم ذرات در فضای بین دهانه ورودی و خروجی در طرح اصلی و جدید آسترهای دیواره آسیا، به ترتیب ۴/۶ و ۴/۵ درصد به دست آمد. نتایج حاصل از آنالیز تصاویر، که توسط نرم‌افزار ImageJ صورت گرفت، نیز نشان داد در دایره قرمز رنگ، میزان فضای خالی بین ذرات در طرح اصلی و طرح جدید به ترتیب برابر با ۳۸ و ۴۲ درصد است. علاوه بر میزان فضای خالی، شکل این فضاهای خالی نیز حایز اهمیت است. زیرا هرچه شکل فضاهای خالی از دایره دورتر باشد، توزیع ذرات در تونل هوای عبوری از آسیا بهتر صورت می‌گیرد. در آسترها با طرح اصلی و جدید، شاخص نزدیکی شکل فضاهای خالی به دایره، به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۶۴ تعیین شدند. این اطلاعات نشان می‌دهد در طراحی جدید، میزان ذرات در جریان هوا، تقریباً برابر با آسترهای طرح اصلی است و ذرات تماس بهتری با جریان هوا دارند. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که آسترهای طرح جدید حتی در خروج ذرات از آسیا نیز بهتر عمل کنند.

۳-۴-۳- بررسی میزان جدانشینی ذرات با اندازه‌های مختلف در آسیا

جدانشینی ذرات معمولاً باعث کاهش کارایی خردایش در آسیاها می‌شود. به دست آوردن درک کامل از تاثیر مواد، طرح



شکل ۱۹: مقایسه توزیع ذرات در کانال هوای عبوری از آسیا در دو طرح اولیه و جدید

همان‌طور که در شکل مشخص است، بخش بارتوده‌ای در طرح جدید آسترها همچنان هلالی شکل است. مقایسه بین ضخامت هلال بار نشان می‌دهد که در طرح جدید آسترها، نقطه مربوط به شانه بار به میزان ۱۰ درجه بالاتر است و ذرات، بیشتر به بخش بار در پرواز منتقل شده‌اند. این به معنی افزایش تعداد ضربات در بخش خردایش ضربه‌ای است. در طرح اصلی، بخشی از ذرات که در آبشاری بزرگ قرار گرفته بودند، یا در مسیر سقوط خود با آسترهای گوه‌ای بیرونی برخورد می‌کردند و یا سوار بر این آسترها با از دست دادن انرژی ضربه‌ای خود، در بخش پاشنه بار فرود می‌آمدند که سایش بالای این آسترها را به دنبال داشتند. از این‌رو، در آسترهای طرح جدید، پاشنه بار در موقعیتی پایین‌تر از طرح اصلی شکل می‌گیرد. علاوه بر این، ذرات در موقعیت پایین‌تری نسبت به طرح اصلی آسترهای دیواره از آسترهای بدنه جدا می‌شوند و در موقعیت‌های پایین‌تری در ناحیه خردایش ضربه‌ای فرود می‌آیند. بخش هلالی شکل بار توده‌ای در هر دو طرح طول، کمانی برابر دارند و این به معنی شبیه‌بودن نواحی مختلف خردایش در دو طرح است. تنها تفاوت، نقطه شانه بار بالاتر در آسترهای طرح جدید است که به تبع آن، نقطه مرکز گردش بار توده‌ای نیز به نقطه‌ای بالاتر منتقل می‌شود.

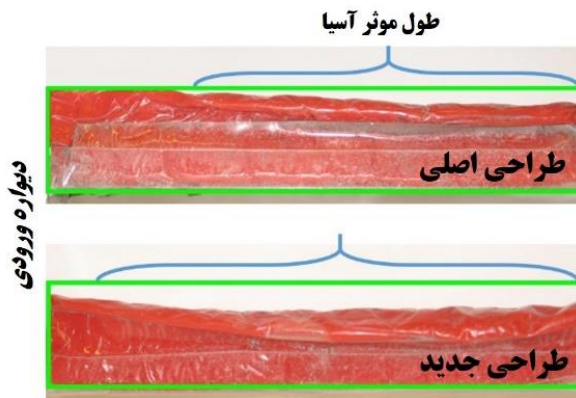
بررسی‌های هندسی رفتار بار در آسیا، نشان می‌دهد که طرح جدید آسترهای دیواره ورودی و خروجی، می‌تواند حرکت مورد نیاز بار را در جهت بهبود عملکرد آسیا فراهم کند.



شکل ۱۸: نمایشی از حرکت بار درون این آسیا با آسترهای دیواره طرح جدید

۳-۴-۴- تعیین طول موثر خردایش در آسیا

طول موثر در آسیا عبارت از طولی است که در آن بستر مواد در پاشنه بار در معرض ضربه مواد و گلوله‌های موجود در آبشاری بزرگ قرار می‌گیرند [۳۸]. به عبارت دیگر طولی از آسیای مدل که در معرض ضربات گلوله‌ها قرار نمی‌گیرد، به عنوان طول موثر در نظر گرفته نمی‌شود. برای تعیین طول موثر در آسیای مدل، از یک آستر خمیری استفاده شد. میزان تغییر شکل در این آستر، نشانی از میزان ضربات وارده به بستر مواد است. شکل ۲۲، مقایسه‌ای از میزان تغییر شکل خمیر در آسیا با آسترهای دیواره با طرح اصلی و جدید را نشان می‌دهد. آسیای مدل، مقیاس کوچک شده و مشابه آسیای صنعتی است. در این شکل، افزایش طول موثر آسیا در طرح جدید کاملاً مشخص است.

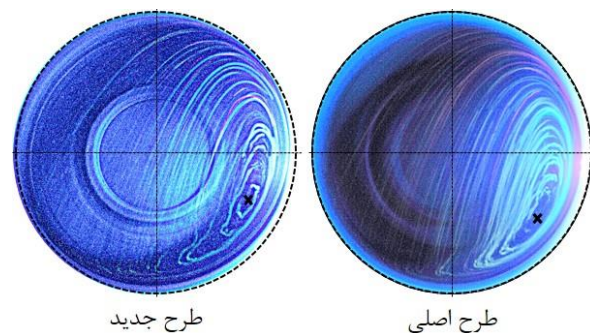


شکل ۲۲: افزایش طول موثر آسیا در زمان استفاده از آسترهای جدید

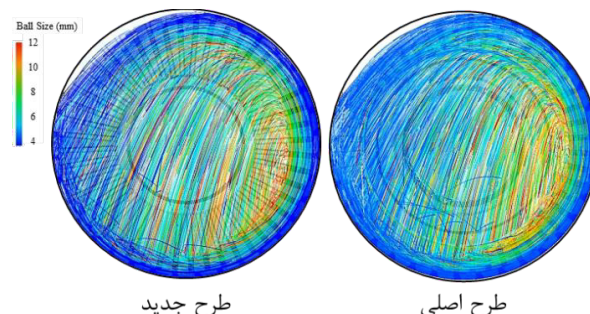
شکل ۲۳، تفاوت میان دو طرح آسترهای دیواره اصلی و جدید را با نمایش حرکت بار شبیه‌سازی شده درون آسیا از نمای جانبی نشان می‌دهد. در طرح جدید، طول موثر آسیا از ۱۱۵ به ۱۷۶ سانتی‌متر افزایش یافته‌است. همان‌طور که در شکل ۲۳ مشخص است، به دلیل حذف آسترهای گوه‌ای (با ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر) و جایگزینی آنها با آسترهای شعاعی (با ارتفاع ۱۴/۵ سانتی‌متر) ممکن شده‌است. در طراحی جدید آسترهای دیواره، میزان برخورد گلوله‌ها و ذرات به بستر مواد به میزان ۵۳ درصد افزایش یافت.

آسترها و معیارهای عملیاتی در ایجاد جدانشینی، قدم مهمی در حل این مساله است. همان‌طور که توضیح داده شد، در این پژوهش، به منظور بررسی این مهم از رهگیری ذرات با فلورسنت (سبز برای ذرات درشت ۱۲ میلی‌متر و قرمز برای ذرات ریز ۵ میلی‌متر) در نور فرابنفش استفاده شد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱، مقایسه‌ای از مسیر حرکت ذرات درشت و ریز و هم‌چنین میزان جدانشینی در دو طرح اصلی و جدید آسترها، به ترتیب در نور فرابنفش و در شبیه‌سازی با DEM را نشان می‌دهد.

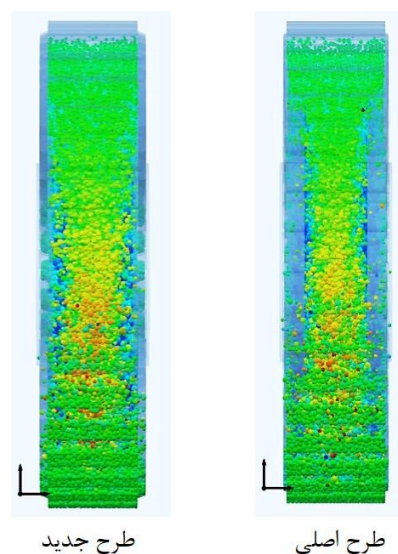
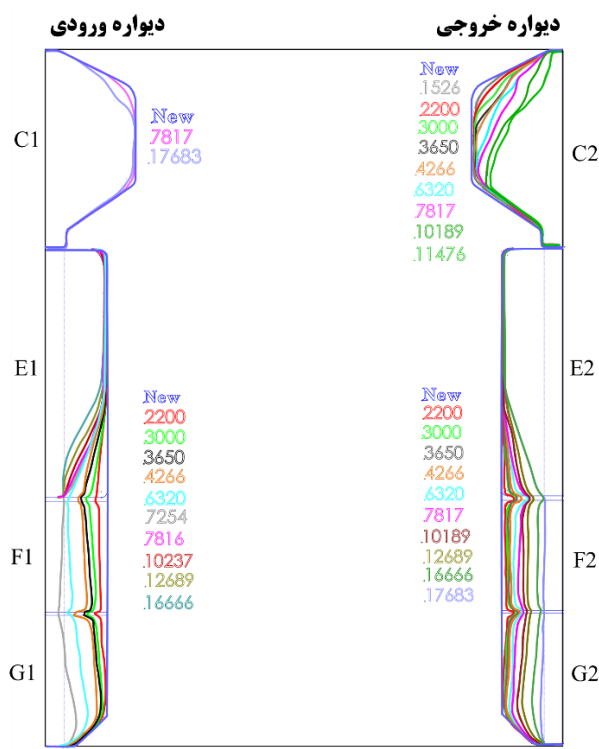
در طرح جدید، گلوله‌های درشت به ناحیه آبشاری، نزدیک‌تر شده‌اند که در نهایت، باعث افزایش انرژی کلی برخورد می‌شود. آنالیز تصاویر هم‌چنین نشان داد که در طرح جدید، توزیع ذرات درشت در ناحیه آبشاری از ۲۸ به ۳۵ درصد افزایش پیدا کرد. این در حالی است که ذرات ریز به مرکز چرخش بار که ناحیه سایس است، انتقال یافتند.



شکل ۲۰: مقایسه بین توزیع ذرات درشت و ریز در نور ماورابنفش با آسترهای دیواره طرح اصلی و جدید (سبز: ذرات درشت، قرمز: ذرات ریز و x: مرکز چرخش بار)



شکل ۲۱: مقایسه‌ای از مسیر حرکت ذرات درشت و ریز را در شبیه‌سازی با DEM



شکل ۲۳: نمایش جانبی از حرکت بار (شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$)

۳-۵- نتایج صنعتی نصب آسترهای دیواره با طرح جدید

۳-۵-۱- کارایی خردایش در آسیا

در این بخش، نتایج کارایی آسیا در یک دوره زمانی برابر با سه بار تعویض آسترهای جداره (۲/۵ سال) مورد بحث قرار می‌گیرد. در طرح جدید آسترها، تناژ متوسط آسیا از ۴۴۱ به ۴۶۵ تن بر ساعت افزایش و دانه‌بندی خروجی آسیا (P_{80}) از ۵۱۹ به ۴۶۵ میکرون کاهش یافت.

۳-۵-۲- عمر آسترها

پایش میزان و نحوه سایش در این آسترها براساس ساعت کارکرد آسیا بود و اندازه‌گیری‌ها در زمان‌هایی خاص برداشت شدند. برای نشان دادن نرخ سایش، بیشترین ارتفاع آسترها به عنوان تابعی از زمان کارکرد ثبت شد. شکل ۲۴، پروفیل‌های سایش در طول یک دوره عمر این آسترها را نشان می‌دهد.

به دلیل درشت‌تر بودن مواد در بخش ورودی، نرخ سایش در دیواره ورودی بیشتر از دیواره خروجی است. علاوه بر این، الگوی سایش در آسترهای دیواره به طور کامل غیریکنواخت است. عمر حلقه بیرونی آسترهای شعاعی (آسترهای F و G) در دیواره ورودی، حدود ۱۱ ماه است. در پرشدگی معمول این آسیا که حدود ۲۴ درصد است، سطح بار هنگام کار آسیا، در موقعیتی بین خط جدا کننده آستر F از آستر E و بخش پایینی آستر E قرار می‌گیرد. به همین دلیل، بیشترین سایش در محدوده بین

شکل ۲۴: الگوی سایش آسترهای دیواره ورودی و خروجی با طرح جدید (اعداد، میزان کارکرد هر کدام از آسترها را بر حسب ساعت نشان می‌دهند).

آستر F و E مشاهده می‌شود و در بخش بالای آستر E، سایش بسیار کم است. نتایج حاصل از پایش مداوم سایش آسترهای دیواره طرح اصلی و جدید، نشان داد که افزایشی قابل توجه در عمر آسترهای طرح جدید ایجاد شده است (شکل ۲۵). بسته به محل نصب قطعات مختلف آسترها، میزان عمر بین ۵۰ تا ۱۸۷ درصد افزایش پیدا کرد. بیشترین میزان افزایش عمر مربوط به آسترهای گوه‌ای بیرونی (موقعیت E) در دیواره ورودی و خروجی آسیا و به ترتیب برابر با ۱۷۵٪ و ۱۸۷٪ بود.

۳-۵-۳- مشخصات مکانیکی آسترها و نقش آنها در کارایی عملیاتی نصب

در طرح جدید، تعداد آسترها از ۵ به ۴ کاهش یافت که باعث کاهش وزن و حجم آنها به میزان ۹ و ۲۳ درصد شد. برای بهبود عملکرد نصابان آستر، مشکلات موجود در جایابی قلاب‌ها و ایستایی آستر هنگام برداشتن آنها نیز رفع شد. در نتیجه، علاوه بر نصب بسیار آسان‌تر آسترها، میزان ریسک و خطر صدمه به کارگران نصاب هنگام نگاه‌داشتن آستر و بستن

درشت در بخش توده‌های بار) و میزان بالای سایش اشاره کرد. براساس این موارد، هدف اصلی در اصلاح طرح این آسترها، استفاده از آسترهایی با ارتفاع کم بود.

طرح جدید شامل آستر با ارتفاع کم، به‌عنوان آستر گوه‌ای درونی (۳۰ سانتی‌متر)، به همراه آسترهای شعاعی با ارتفاع کوهان ۱۴٫۵ سانتی‌متر است. این آسترها با توجه به فراهم کردن شرایط بهتر برای خردایش، باعث افزایش کارایی آسیاکنی و طول عمر آسترها شدند. طول موثر آسیا در آسترهای با طرح جدید، ۵۳ درصد افزایش یافت (از ۱۱۵ به ۱۷۶ سانتی‌متر) و این تغییر، امکان استفاده بهتر از طول آسیا را فراهم کرد.

مقایسه سه دوره از عمر آسترها بین سال‌های ۹۲ تا ۹۶ نشان‌داد که تناژ آسیا از متوسط ۴۴۱ به ۴۶۵ تن‌برساعت افزایش و میزان اندازه محصول مدار خردایش (۸۰ درصد عبوری) نیز از ۵۱۹ به ۴۷۹ میکرون کاهش یافت.

پایش مداوم سایش آسترهای دیواره طرح اصلی و جدید، نشان داد که افزایش قابل توجهی (۵۰ تا ۱۸۷ درصد) در عمر آسترهای طرح جدید بسته به محل نصب قطعات مختلف آسترها ایجاد شده است.

یکی از موارد بسیار مهم در طراحی این آسترها، در نظر گرفتن ملاحظات نصب و تعویض بود. به دلیل وزن کمتر (کاهش کلی به میزان ۹ درصد)، طراحی بهتر و همکاری نزدیک با نیروهای نصاب در مرحله طراحی، زمان کلی تعویض به میزان ۳۷٫۵ درصد کاهش و با توجه به عمر بالای این آسترها، مقدار زمان دسترسی آسیا در طول سال، مقدار ۱۰۱ ساعت افزایش یافت.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان از شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل‌گهر و شرکت گهر روش، برای فراهم آوردن امکان انجام این تحقیق و اجازه انتشار مقاله، تقدیر و تشکر می‌شود.

۶- مراجع

[1] Daniel, M., Lane, G., and McLean, E. (2010). "Efficiency, economics, energy and emissions Emerging criteria for comminution circuit decision-making". XXV IMPC, 6-11 September 2010, Brisbane, Australia, 3523-3531.

[2] Pokrajcic, Z., and Morrison, R. (2010). "A methodology for the design of energy efficient comminution circuits". PhD Thesis, Sustainable Minerals Institute, the



شکل ۲۵: افزایش قابل ملاحظه عمر آسترهای دیواره طرح جدید (اعداد، میزان افزایش عمر در هر یک از قطعات آستر دیواره را نشان می‌دهند)

پیچ‌های مربوط نیز تا میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. میزان مصرف آسترها هم به دلیل وزن کمتر آسترها در انتهای عمر خود، به میزان ۱۳ درصد کاهش پیدا کرد.

۳-۴-۵- میزان در دسترس بودن آسیا

در طرح جدید، مقدار زمان دسترسی به آسیا که یکی از معیارهای مهم در افزایش بهره‌وری است، به میزان سالانه ۱۰۱ ساعت، افزایش پیدا کرد و علت آن، راحتی نصب (سرعت در تعویض آسترها) و عمر بالای آسترها بود. میزان زمان لازم برای تعویض آسترهای طرح جدید نسبت به طرح اصلی، ۳۷٫۵ درصد کاهش یافت.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور ارزیابی کامل آسترهای دیواره ورودی و خروجی در آسیاهای نیمه خودشکن خشک شرکت صنعتی و معدنی گل‌گهر انجام شد. بررسی رفتار بار داخل آسیای نیمه خودشکن خشک، به وسیله مشاهدات مستقیم، شبیه‌سازی فیزیکی در آسیای مدل و همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم افزاری با استفاده از نرم افزار $KMPC_{DEM}$ صورت گرفت. نتایج نشان داد که این آسترها آن‌چنان که مطرح می‌شود، شرایط بهینه را برای خردایش فراهم نمی‌کنند. از مهم‌ترین معایب این آسترها با طرح اصلی، می‌توان به کاهش طول موثر آسیا (به میزان ۵۳ درصد)، جدانشینی ذرات (تجمع ذرات

- (2013). "A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills". Minerals Engineering, 46-47: 157-166.
- [16] Maleki-Moghaddam, M., Hasankhoei, A. R., Arghavani, E., Haji-Zadeh, A., Yahyaei, M., and Banisi, S. (2015). "Evolution of AG mill shell liner design at the Gol-E Gohar iron ore concentration plant". SAG Conference, Vancouver, Canada, 52: 1-12.
- [17] Cleary, P. W., and Owen, P. (2018). "Development of models relating charge shape and power draw to SAG mill operating parameters and their use in devising mill operating strategies to account for liner wear". Minerals Engineering, 117: 42-62.
- [18] Coles, H. R., and Chong, S. P. (1983). "New liner design improves Aerofall mill throughput". Mining Engineering, SME, 1556-1560.
- [19] Toor, P., Franke, J., Powell, M. P., Bird, M., and Waters, T. (2013). "Designing liners for performance not life". Mining Engineering, 43-44: 22-28.
- [20] Royston, D. (2007). "Semi-autogenous grinding (SAG) mill liner design and development". Materials & Manufacturing Processes, 24 (3): 121-132.
- [21] Powell, M. S. (1991b). "The design of rotary-mill liners, and their backing materials". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 91(2): 63-75.
- [22] Kingdon, G., and Coker, R. A. (2015). "The eyes have it: improving mill availability through visual technology". International Semi-Autogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology, Vancouver, Canada, P3, 1-15.
- [23] Rajamani, R. K., and Mishra, B. K. (1996). "Dynamics of ball and rock charge in SAG mills". In: *Proceedings Advances in Autogenous and SAG Technology*, Vancouver, II, Vancouver, 700-712.
- [24] Morrison, R. D., and Cleary, P. W. (2008). "Towards a virtual comminution machine". Minerals Engineering, 21: 770-781.
- [25] Cleary, P. W., Sinnott, M. D., and Morrison, R. D. (2008). "DEM prediction of particle flows in grinding processes". International Journal for Numerical Methods in Fluids, 58: 319-353.
- [26] Cleary, P. W., and Owen, P. (2018). "Development of models relating charge shape and power draw to SAG mill operating parameters and their use in devising mill operating strategies to account for liner wear". Minerals Engineering, 117: 42-62.
- University of Queensland.
- [3] Davis, E. W. (1919). "Fine crushing in ball mills". Trans. SME-AIME, 61: 250-296.
- [4] Mishra, B. K., and Rajamani, R. K. (1990). "Motion analysis in tumbling mills by the discrete element method". KONA, Powder and Particle, 8: 92-98.
- [5] Kalala, J. T., Breetzke, M., and Moys, M. H. (2008). "Study of the influence of liner wear on the load behaviour of an industrial dry tumbling mill using the discrete element method (DEM)". International Journal of Mineral Processing, 86(1): 33-39.
- [6] McElroy, L., Bao, J., Yang, R. Y., and Yu, A. B. (2009). "A soft-sensor approach to flow regime detection for milling processes". Powder Technology, 188: 234-241.
- [7] Pérez-Alonso, C., and Delgadillo, J. A. (2012). "Experimental validation of 2-D DEM code by digital image analysis in tumbling mills". Minerals Engineering 25: 20-27.
- [8] Sinnott, M. D., Cleary, P. W., and Morrison, R. D. (2017). "Combined DEM and SPH simulation of overflow ball mill discharge and trommel flow". Minerals Engineering, 108: 93-108.
- [9] Xu, L., Luo, K., and Zhao, Y. (2018). "Numerical prediction of wear in SAG mills based on DEM simulations". Powder Technology, 329: 353-363.
- [10] Parks, J. L. (1998). "The influence of designs, maintenance practices, and operating conditions on SAG and AG Mill liner performance". Comminution Practices, SME, pp. 173.
- [11] Parks, J. L. (1989). "Liner design, materials and operating practices for large primary mills". Advances in Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, Vancouver, 2: 565-580.
- [12] Powell, M. S., Smit, I., Radszewski, P., Cleary, P., Rattray, B., Eriksson, K., and Schaeffer, L. (2006). "The selection and design of mill liners". Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, USA, 331-376.
- [13] Rajamani, R. (2006). "Semi-autogenous mill optimization with DEM simulation software". Advances in Comminution, SME Publication, Part 4, 209-214.
- [14] Yahyaei, M., Banisi, S., and Hadizadeh, M. (2009). "Modification of SAG mill liner shape based on 3-D liner wear profile measurements". International Journal of Mineral Processing, 91: 111-115.
- [15] Maleki-Moghaddam, M., Yahyaei, M., and Banisi, S.

- [39] Weston, D. (1951). "Material reduction mill". U.S., Patent No. 2555171A.
- [40] Weston, D., and Turner, R. R. (1964). "Why the Aerofall mill is unique in comminution field". ALME Meeting, New York, 1-37.
- [41] Ghasemi, A. R., Hasankhoei, A. R., Parsapour, Gh. A., and Banisi, S. (2016). "Modifying the design of drying chamber flights of the Gol-E-Gohar pelletizing plant ball mill". XXVIII IMPC, Quebec City, Canada, 1459-1469.
- [42] Morrison, A., Govender, I., Mainza, A., and Parker, D. (2016). "The shape and behaviour of a granular bed in a rotating drum using Eulerian flow fields obtained from PEPT". Chemical Engineering Science, 152: 186-198.
- [43] Morrell, S. (1992). "Prediction of grinding-mill power. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy". Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 101: C25-C32.
- [44] Powell, M. S., and McBride, A. T. (2004). "A three-dimensional analysis of media motion and grinding regions in mill". Minerals Engineering, 17: 1099-1109.
- [45] Yahyaei, M., Weerasekara, N.S., Powell, M.S., 2015. "Characterization of superficial breakage using multi-size pilot mills". Minerals Engineering, 81: 71-78.
- [27] Herbst, J. A., and Nordell, L. (2001). "Optimization of the design of SAG mill internals using high fidelity simulation". In Proceedings Advances in Autogenous and SAG Technology. Vancouver, IV, 150-164.
- [28] Kalala, J. T., Bwalya, M. M., and Moys, M. H. (2005). "Discrete element method (DEM) modeling of evolving mill liner profile due to wear. Part I: DEM validation". Minerals Engineering, 18: 1386-1391.
- [29] Kalala, J. T., Bwalya, M. M., and Moys, M. H. (2005b). "Discrete element method (DEM) modelling of evolving mill liner profiles due to wear. Part II Industrial case study". Minerals Engineering, 18: 1392-1397.
- [30] Jayasundara, C. T., Yang, R. Y., Yu, A. B., and Curry, D. (2006). "Discrete particle simulation of particle flow in IsaMill". Industrial & Engineering Chemistry Research, 19: 6349-6359.
- [31] Tavares, L. M., and de Carvalho, R. M. (2009). "Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills". Minerals Engineering, 22: 650-659.
- [32] Powell, M. S., Weerasekara, N. S., Cole, S., LaRoche, R. D., and Favier, J. (2011). "DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills". Minerals Engineering, 24: 341-351.
- [33] Delaney, G. W., Cleary, P. W., Morrison, R. D., Cummins, S., and Loveday, B. (2013). "Predicting breakage and the evolution of rock size and shape distributions in AG and SAG mills using DEM". Minerals Engineering, 50-51: 132-139.
- [34] Wills, B. A., and Finch, J. A. (2015). "Mineral Processing Technology". 8th Edition, Print Book amp; EBook: ISBN 9780080970530.
- [35] Hadsel, A. D. (1935). "Ore reducing machine". U.S., Patent No. 2008863.
- [36] Lynch, A. J., and Rowland, C. A. (2005). "The History of Grinding. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration". Inc. (SME), 8307 Shaffer Parkway, Littleton, Colorado, USA, EBook: ISBN 978-0-87335-281-9.
- [37] Aerofall mills operation manual, (1992). ThyssenKrupp POLYSIUS Ltd.
- [38] Turner, R. (1962). "Synthetic charge for material reduction mills". U.S., Patent No. 3058675A.

¹ Aerofall mill² Benson³ Deflector⁴ Lifter⁵ Keying action⁶ Discrete element method⁷ Shoulder⁸ Center of circulation⁹ Head¹⁰ Impact toe¹¹ Bulk toe



Imam Khomeini International University
Vol. 5, No. 2, Summer 2020, pp. 33-38



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2019.11235.1292

Improvement in Designing Dry SAG Mills End Liners - Proposed for Gol-E-Gohar Mine

Hasankhoei A.R.¹, Maleki-Moghaddam M.², Arghavani E.³, Haji-Zadeh A.⁴, Barzgar M.E.⁵, Banisi S.^{6*}

1- P.h.D. Student, Kashigar Mineral Processing Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

a.hasankhoie@kmpc.ir

2- Professor, Mineral Processing Group, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

M.Maleki@vru.ac.ir

3- M.Sc, Kashigar Mineral Processing Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

e.arghavani@kmpc.ir

4- M.Sc, Gol-E-Gohar Mining and Industrial Company, Sirjan, Iran

hajizadeh_am@golgozar.com

5- M.Sc, Gohar-Ravesh Company, Sirjan, Iran

barzgar.bizaki@gmail.com

6- Professor, Dept. of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Banisi@uk.ac.ir

(Received: 22 Jul. 2019, Accepted: 03 Nov. 2019)

Abstract: The effect of shell liners on mill performance has been the subject of various studies, but little known about the effect of dry SAG mills end liners on throughput and grinding efficiency. In particular, in the case of dry Aerofall mill types where it has been claimed that the end liners play a key role in the crushing and grinding actions. This paper experimentally characterizes the role of end liners in dry SAG mills with the objective of obtaining a thorough understanding of the effects of end liners design on the load trajectory and SAG mill performance. It was thought the characterization study will lead to design new end liners which eliminate or reduce the shortcomings of the current liners and improve the comminution efficiency mainly by prolonging liner life. The test works conducted in a scale down mill with a diameter of 1m indicated that conventionally used "deflector" type liners did not provide efficient environment for grinding. Direct observations obtained from the model mill during tests by various visualization techniques, along with simulations using the KMPCDEM software were the main sources of understanding flow behavior of charge inside the mill. In this research, to improve the grinding efficiency, a new design using low profile end liners incorporating radial ribs of proper height was investigated. The special design of model mill made it possible to increase the radial ribs height in steps of 6mm up to 18.5mm. The transparent end of the mill enabled accurate trajectory determination by image analysis. The results indicated that the new lower height profile deflectors and 15.5mm-height (14.5cm in industrial scale) radial ribs improved the mill performance while avoiding excessive pressure drop across the mill and wear on the liner. The image

analysis showed that the use of new liners increased the distribution of coarse particles across the mill cross section from 28% to 35%. A new liner design was proposed by decreasing the number of liners in each slice from 5 to 4 pieces. The thickness of the inner head liners reduced from 45cm to 30cm and the outer deflector liners replaced by 14.5 cm radial ribs. The distance between the feed and discharge liners increased from the original 115cm to 176cm which increased the effective length of the mill by 53%. The new design reduced the weight and volume of end liners by 9% and 23%, respectively. On account of installation of the new liners in Aerofall SAG mills the throughput increased from 441 to 465 t/h, the product size decreased from 519 to 480 μm and the amount of recycled material from the SAG mill product decreased from 10 to 6%. The most significant improvement was observed in the liner life; an increase of 50 to 200 % in liner life depending on the location of end liners was achieved. The relining time also reduced by 37.5% with the new liners.

Keywords: AG/SAG mill, Feed end liners, Discharge end liners, Gol-E-Gohar, Simulation, DEM.

INTRODUCTION

Over the years, the principal functions of mill liners have remained the same: mill shell protection, energy transfer to the charge, retaining grinding media, product classification, and material transportation from the mill [1]. It is well known that liner profile can be improved to increase throughput or liner life. It is, therefore, logical to assume that parameters can influence mill performance receive more attention and be the subject of careful evaluation and research. The effect of shell liner on mill performance has been the subject of various studies [2-8], but little known about the effect of dry SAG mills end liners on throughput and grinding efficiency [9]. In particular, in the case of dry Aerofall mill types where it has been claimed that the end liners play a key role in the crushing and grinding actions [10].

Without a detailed study on how the liners are actually performing, the risks associated with a redesign program are unacceptably high. What is often lacking in liner improvements programs, are the tools to characterize the current performance which enable intelligent decisions to be made based on reliable and accurate data. This paper experimentally characterizes the role of end liners at the Gol-E-Gohar iron ore mining and industrial company located southeast of Iran with the objective of obtaining a thorough understanding of the effects of end liner design on the load trajectory and SAG mill performance. It was thought the characterization study will lead to design new end liners which eliminate or reduce the shortcomings of the current liners and improve the comminution efficiency mainly by prolonging liner life. This paper presents the new end liner design for Aerofall SAG mills with the aim of improving milling performance by increasing the “effective impacts” defined as the impacts of sufficient energy that hit the particles not the liners.

METHODS

The process of designing a new end liner started with the characterization of the original liner design and modification of the geometry to obtain the desired shape. Various experimental methods were conducted to study the design features of the original liners. These methods can be divided into three groups: visualization of charge motion, analysis derived from indirect measurements and the quantitative analysis of industrial wear measurement data. In order to investigate the effects of deflectors on the charge behaviour, a scale-down version of the original end liners (Figure 1A) were manufactured and installed in a model mill. Direct observations from model mill along with simulations using the KMPC_{DEM} software were used to understand the behaviour of charge inside the mill. After implementation of all modifications, the new liner design was finalized (Figure 1B), manufactured and installed in two of the Gol-E Gohar SAG mills.

FINDINGS AND ARGUMENT

The objective of the liner improvement project was to increase the grinding efficiency and liner life time through liner design change. It has been reported that the design of end liners affects both the grinding efficiency and the rate of metal wear in Aerofall SAG mills [9]. These observations suggested a detailed understanding of the behaviour of the charge motion in the original system a prerequisite to arrive at an

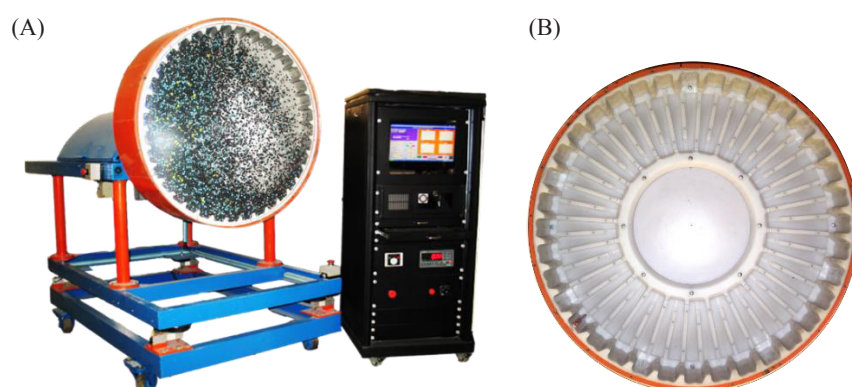


Figure 1. A: The laboratory-scale SAG mill experimental setup with control and data acquisition systems, B: configuration of new end liners installed in the model mill

optimal liner design. It was thought that any successful design change requires a thorough knowledge regarding the function of various components of the liners.

Direct observations obtained from the model mill during tests by various visualization techniques, along with simulations using the $KMPC_{DEM}$ software were the main sources of understanding flow behavior of charge inside the mill. DEM and particle tracing in UV-light overcame the limitation of transparent-end mill technique in showing the depth of the mill. Figure 2 shows the charge motion in the model mill with original liners.

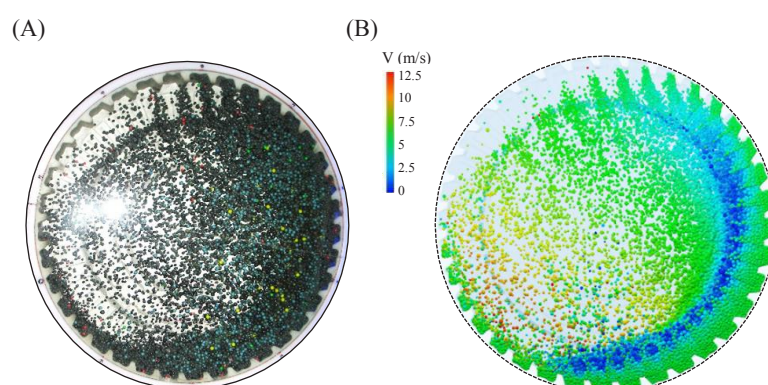


Figure 2. Charge motion in the model mill A: with original end liners and B: charge motion in case a simulated with DEM

An experimental method presented in this work can be used to characterize segregation with the objective of de-segregation through re-designing of outer deflector liners. Figure 3 presents trajectory of various particle sizes in the model mill which also shows radial segregation of particles. In Figure 3A, large and small balls painted with green and red fluorescent colors, respectively. Under the UV light, the paths of large and small balls could be clearly differentiated. As it can be observed in Figure 3B, larger balls are closer to the center of the charge and smaller balls are mostly located outside of the bulk of the charge (i.e., in the cataracting zone). This indicates that large particles which should be in the cataracting zone and participate in the high energy impact action, have accumulated in the circulation area.

This study experimentally characterizes the role of end liners at the Gol-E-Gohar mining and industrial company located southeast of Iran with the objective of obtaining a thorough understanding of the effects of end liner design on the load trajectory and SAG mill performance. At the Gol-E-Gohar iron ore concentration plant, three $9m \times 2.05m$ Aerofall SAG mills are used in parallel in a dry operation to grind a magnetite ore [11]. It was decided to prepare the new design of end liners for installing in one of these mills.

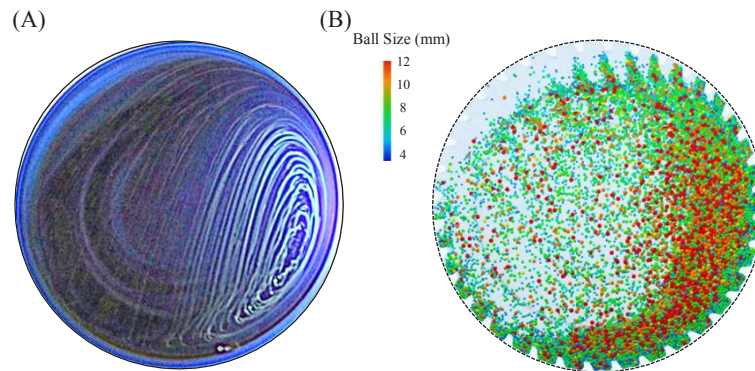


Figure 3. Snapshots of the charge in the mill model A: under UV light and B: DEM simulation

In designing new liners for the industrial Aerofall SAG mill, the following points were considered: reducing the number of parts inside the mill, reduction of assembly and replacement time, extending useful life of liner parts, ensuring safe installation and operation. A special attention was also devoted to consistency of the new end liners with the shell liners to avoid any adverse effect on the performance. All components must be designed in a way that to minimize the number of maintenance shutdowns. In compliance with this criterion, in the new design, the number of liners in each slice decreased from 5 to 4 pieces. Changing the design of deflector liners resulted in a reduction of the weight and volume by 9% and 23%, respectively (Figure 4). Due to lower liner weight and volume and also simple pattern of new design, the relining operation became safer and the time required reduced by 37.5%.



Figure 4. 3D model of the new liners in the Aerofall SAG mill at the Gol-E-Gohar iron ore concentration plant

CONCLUSIONS

- The tests were performed to characterize various functions of the Aerofall SAG mill end liners at the Gol-E-Gohar mining and industrial company. It was found that the function of the deflector liners might not be as critical as it is claimed and believed.
- In order to characterize the original liners, a 100cm×10.8cm model mill and simulations using the KMPCDEM software were used. The charge divided into three main regions, the crescent-shape bulk region, the dispersed region and carry over region.
- It was shown that the liner in the first and the last 20% of the mill length under the protection of the deflector liners experienced no deformation. This meant that 40% of the mill length do not actively participate in the grinding process and the energy of falling media is wasted by impacting the outer deflectors.

- The plant data also showed that at the end of inner deflector liners life, when two-third of liner height still remained, no significant change in the pressure drop across the mill was reported. It was found that 30.6% (v/v) of material are in-flight region and 4.6% of particles are subjected to the active air stream.
- The original deflector liners used in the Gol-E-Gohar dry SAG mill was not found to be optimal. The new liners must provide the keying action and should deflect the material towards airflow while overcoming the drawbacks of original liners (i.e., lower mill effective length, high liners wear rate and particles segregation).
- The characterization of the original deflector liners in Aerofall SAG mill of the Gol-E-Gohar mining and industrial company, indicated that the function of the deflector liners might not be as critical as claimed and did not provide the best performance for the mill. The deflector liners drawbacks were decreasing the effective mill length by 53 %, segregation of particles and high wear rate in end liners. To overcome these limitations, the new end liner was designed using low profile ribs.
- To decrease the height of inner deflector, radial ribs were incorporated in the end liner design. With the use of a low profile liner (the inner deflector thickness reduced from 450 to 300 mm) incorporating radial ribs of proper height (145 mm) provided a better environment grinding. The effective length of SAG mill with the new end liner design increased by 53 % (from 115 cm to 176 cm (which allowed more efficient use of the mill length).
- For a period of life of three shell liner sets (2.5 years). The mill throughput was approximately 441 t/h and increased to 465 t/h after the end liners modification and the 80% passing size of mill product decreased from 519 to 479 microns. Furthermore, the amount of recycled material also decreased from 9.6% to 6.5% on account of efficient impact breakage of critical size material.
- Measurements and calculations performed on both original and new liner designs revealed that the liner wear life improved 50% to 187% depending on the location of liners.
- The number, weight and design of new liners made the relining task less challenging and time consuming. In comparison to original liners, the relining time was only 62.5% of the original ones. As a result of a decrease in relining time and increase in liners life, the total downtime of SAG mill decreased by 101 hours per year.

REFERENCES

- [1] Parks, J. L. (1998). *“The influence of designs, maintenance practices, and operating conditions on SAG and AG Mill liner performance”*. Mining Engineering, SME.
- [2] Parks, J. L. (1989). *“Liner design, materials and operating practices for large primary mills”*. Advances in Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, Vancouver, 2: 565–580.
- [3] Powell, M. S., Smit, I., Radsizewski, P., Cleary, P., Rattray, B., Eriksson, K., and Schaeffer, L. (2006). *“The selection and design of mill liners”*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, USA, 331-376.
- [4] Rajamani, R. (2006). *“Semi-autogenous mill optimization with DEM simulation software”*. Advances in Comminution, SME Publication, Part 4, 209–214.
- [5] Yahyaei, M., Banisi, S., and Hadizadeh, M. (2009). *“Modification of SAG mill liner shape based on 3-D liner wear profile measurements”*. International Journal of Mineral Processing, 91: 111–115.
- [6] Maleki-Moghaddam, M., Yahyaei, M., and Banisi, S. (2013). *“A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills”*. Minerals Engineering, 46-47: 157-166.
- [7] Maleki-Moghaddam, M., Hasankhoei, A. R., Arghavani, E., Haji-Zadeh, A., Yahyaei, M., and Banisi, S. (2015). *“Evolution of AG mill shell liner design at the Gol-E Gohar iron ore concentration plant”*. SAG conference, Vancouver, Canada.
- [8] Cleary, P. W., and Owen, P. (2018). *“Development of models relating charge shape and power draw to SAG mill operating parameters and their use in devising mill operating strategies to account for liner wear”*. Minerals Engineering, 117: 42-62.

- [9] Coles, H. R., and Chong, S. P. (1983). "New liner design improves Aerofall mill throughput". Mining Engineering, SME, 1556-1560.
- [10] Meaders, R. C., and MacPherson, A. R. (1964). "Technical design of autogenous mills". Mining Engineering (AIME), 81-83.
- [11] Aerofall mills operation manual, (1992). ThyssenKrupp POLYSIUS Ltd.