

فناوری بومی طراحی آستر برای آسیاهای گردان صنعتی

مصطفی مالکی مقدم^{*}، صمد بنیسی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر رفسنجان

۲- استاد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۸، پذیرش: دی ۱۳۹۸)

چکیده

آستر آسیاهای گردان، عامل انتقال انرژی به مواد داخل آسیا است و تاثیر قابل توجهی بر رفتار بار در داخل آسیا دارد. برای دستیابی به فناوری بومی طراحی آستر، با بهره‌گیری از تجهیزات و نرم‌افزارهای طراحی و ساخته شده داخلی، یک بسته تخصصی و دانش‌بنیان در زمینه طراحی آسترهای آسیاهای گردان ارائه شد. برای اجرای طراحی آستر، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز GMT و روش اجزا گسسته (راگ، DEM) سه‌بعدی (3D-DEM) با استفاده از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ طرح آستر جدید که مسیر مناسب برای گلوله را در داخل آسیا فراهم می‌کند، به دست می‌آید. در مرحله بعد با کمک آسیای مدل، مناسب بودن طرح، تایید و نقشه‌های ساخت تهیه می‌شود. پس از ساخت و نصب آسترهای پیشنهادی، وضعیت سایش آسترهای جداره با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مخصوص ثبت و با تهیه مدل سه‌بعدی از آسترها، طرح آستر به منظور افزایش عمر آن و کاهش میزان قراضه، بهینه‌سازی می‌شود. به کارگیری این فناوری در طراحی آسترهای آسیاهای خودشکن مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر و افزایش زاویه صفحه بالابر از ۷ به ۳۰ درجه، باعث افزایش ۱۷ درصدی ظرفیت آسیا شد. استفاده از این بسته طراحی در آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه باعث شد با افزایش زاویه صفحه بالابر آستر از ۱۵ به ۳۰ درجه، کاهش تعداد ردیف بالابرها از ۶۰ به ۴۰، متوسط نرخ خوراک ورودی به آسیا از میزان ۸۶۰ به ۸۷۸ تن بر ساعت افزایش یابد و مهم‌تر از آن تعداد شکست آسترها نیز از متوسط ۴/۲ قطعه به یک قطعه، کاهش یابد.

کلمات کلیدی

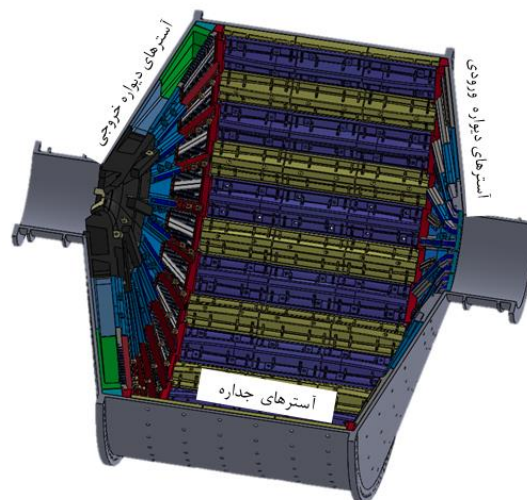
فناوری بومی، آسیای گردان، آستر، گل‌گهر، سرچشمه

* عهده‌دار مکاتبات: m.maleki@vru.ac.ir

۱- مقدمه

در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، آسیاکنی بیشترین سهم مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای را دارد و کمتر از ۵ درصد از این انرژی صرف خرد کردن مواد می‌شود [۱]. از میان تجهیزاتی که جهت خردایش مواد معدنی استفاده می‌شود، آسیاهای گردان بیشترین کاربرد را دارند. آسیاهای گردان تجهیزاتی استوانه‌ای شکل هستند که به صورت افقی در کارخانه‌های فرآوری نصب می‌شوند. مواد معدنی به طور پیوسته از یک طرف وارد آسیا شده و پس از خردایش، از طرف دیگر آسیا، خارج می‌شوند. نحوه حرکت مواد در آسیا، به طور مستقیم بر عملکرد آسیاها (ظرفیت و اندازه محصول خروجی) تاثیرگذار است [۲].

سطوح داخلی آسیا با آسترهایی پوشیده می‌شود که عمده وظایف آن مقاومت در برابر ضربات وارده شده از طرف مواد و واسطه، مقاومت در برابر سایش و ایجاد حرکتی مطلوب برای بار است [۱، ۳]. آسترهای جداره دارای بالابرهایی (Lifter) با اشکال مختلف هستند. در شکل ۱ مدل صنعتی آسترهای جداره و دیواره ورودی و خروجی آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه نشان داده شده است.



شکل ۱: مدل صنعتی آسترهای آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه

فهم بهتر سازوکار انرژی مصرفی و رفتار بار درون آسیا می‌تواند منجر به صرفه‌جویی چشمگیری در انرژی مصرفی شود [۲، ۵]. با درک دقیق رفتار بار می‌توان با تغییر عواملی مانند سرعت و طرح آستر، ظرفیت خردایش و کارایی

آسیاکنی را افزایش داد و کنترل آسیا را آسان‌تر نمود. در آسیاهای گردان، انرژی وارد شده از موتور به آسیا (به جز بخش‌هایی که به صورت‌های مختلف تلف می‌شود) صرف حرکت بار می‌شود. در این میان، آستر آسیا عامل انتقال انرژی وارد شده به مواد داخل آسیا است و تاثیر قابل توجهی بر رفتار بار داخل آسیا دارد. به همین دلیل، بررسی نقش آستر بر الگوی حرکت بار در داخل آسیا موضوع تحقیقات زیادی بوده است [۷-۵].

مسیر حرکت بار در آسیاهایی که از نظر مشخصات ابعادی و شرایط عملیاتی یکسان، ولی دارای بالابرهایی با الگوی متفاوت بوده‌اند، متفاوت گزارش شده که به معنای تحت تاثیر قرار گرفتن سازوکار خردایش در آنها است. آسترهای بدون بالابر، میزان سایش در آسیا را افزایش داده و در نتیجه محصول ریزتری تولید می‌کنند. وجود بالابر در آسیا، موجب سقوط بار از ارتفاع بالاتر شده و با غالب شدن سازوکار ضربه در داخل آسیا، محصول درشت‌تری تولید می‌شود [۱]. تغییر در نقطه برخورد گلوله در نتیجه تغییر طرح آستر، منجر به برخورد مستقیم گلوله به آستر، شکسته شدن آستر و توقفات بسیار هزینه بر آسیا می‌شود [۸].

هدف طراحی آستر در دو دهه اخیر، بهبود کارایی آسیاکنی از طریق تغییر در زاویه صفحه بالابر (با هدف جلوگیری از شکست آسترها و گلوله‌ها) و تغییر در نسبت فاصله به ارتفاع بالابرها (برای کاهش فشردگی و بهبود بالابری بار و ظرفیت آسیاکنی) است. استفاده از آسترهایی با زاویه صفحه بالابر و فاصله بیشتر در سال‌های اخیر افزایش یافته است. افزایش زاویه صفحه بالابر در آسترهای جداره آسیا (برای یک سرعت مشخص در آسیا) نقطه برخورد گلوله‌های پرتاب شده روی دیواره طرف مقابل را (بر حسب فاصله آن از پاشنه) کاهش می‌دهد و در نتیجه موجب کاهش آسیب به آسترها می‌شود. با افزایش زاویه صفحه بالابر میزان برخورد مستقیم گلوله با آسترها کاهش پیدا می‌کند. حداکثر ابعاد گلوله‌های اضافه شده به آسیا نیز از مقدار معمول ۱۰۴ میلی‌متر به ۱۲۵ میلی‌متر و در بعضی موارد به ۱۴۰ و ۱۵۲ میلی‌متر رسیده است. این مسئله رویکرد جدید در طراحی آسترها را، با در نظر گرفتن حرکت بار و به خصوص مسیر حرکت گلوله‌ها در داخل آسیا، ضروری می‌نمود [۳، ۹-۱۱].

حرکت بار و شکل آن در داخل آسیاهای گردان توسعه یافت. راجامانی و همکارانش^۶ پس از شبیه‌سازی‌های روش اجزا گسسته (Discrete Element Method; DEM) دو بُعدی از راگ سه بُعدی (3D-DEM) استفاده کردند که به دلیل در نظر گرفتن برهم‌کنش ذرات داخل آسیا در راستای طول آسیا به واقعیت نزدیک‌تر بود [۱۹]. روش اجزای گسسته (راگ)، یک روش محاسباتی قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی مجموعه‌ای از ذرات جدا از هم است و چون حدود ۷۰ درصد از فرآیندهای صنعتی شامل جریان‌های ذره‌ای هستند، در اکثر صنایع مانند صنایع هسته‌ای، دارویی، نظامی، عمرانی و نیز صنعت فرآوری مواد معدنی کاربرد دارد [۲۰-۲۷].

در پژوهشی که توسط بیان و همکاران^۷ انجام شد، با استفاده از روش راگ، تاثیر میزان پرشدگی گلوله، ارتفاع بالابر آستر و سرعت آسیا در آسیاهای گلوله‌ای مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از آسیای آزمایشگاهی به اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی پرداخته شد [۲۰]. کلیری و اوین^۸ (۲۰۱۸) با انجام شبیه‌سازی به روش راگ رابطه بین پارامترهای شکل بار و عوامل عملیاتی پرشدگی، ارتفاع بالابر و سرعت آسیا را بررسی کردند [۲۱]. تاثیر عوامل مختلف بر سایش آسترها و کارکرد آسیا با استفاده از روش راگ و به کارگیری مدل‌های سایش در تحقیق دیگری توسط زو و همکاران^۹ مورد بررسی قرار گرفت [۲۲]. جورجوپ و همکاران^{۱۰} با استفاده از روش اجزا گسسته اثر ارتفاع آستر و سرعت آسیا را روی توان‌کشی آسیا و بارهای ضربه‌ای در یک آسیای خودشکن به قطر ۵ متر بررسی نمودند و نشان دادند تعداد و ارتفاع آستر، سرعت آسیا و درصد پرشدگی آسیا تاثیر زیادی در بارهای ضربه‌ای و توان‌کشی دارند [۲۳، ۲۴].

۱-۱- ضرورت بومی‌سازی طراحی آستر آسیاهای صنعتی

ارزش افزوده حاصل از فناوری‌های پیشرفته و یا افزایش بهره‌وری حاصل از آنها در کاهش هزینه‌های تولید و خدمات، باعث شده است فناوری به عنوان ابزاری استراتژیک در دست تولیدکنندگان و کشورهای صاحب فناوری تبدیل شود. ایران کشوری است با فرهنگ کهن و دیرینه که طی زمان‌های طولانی ساکنان آن برای تطبیق با شرایط محیط و پاسخ به نیازهای زیستی در زمینه‌های مختلف، انواع فناوری‌های ساخت و تولید را به وجود

از آنجا که مشاهده مستقیم شکل بار و مسیر حرکت آن در آسیاهای صنعتی امکان‌پذیر نیست، ترکیبی از روش‌های فیزیکی و تحلیلی برای تعیین شکل بار استفاده می‌شود [۱۲، ۱۳]. به منظور تعیین مسیر حرکت بار در داخل آسیا به صورت تحلیلی و با توجه به مشخصات آستر و شرایط عملیاتی آسیا، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند Milltraj [۱۴] و GMT (Grinding Media Trajectory) [۱۵] توسعه داده شده‌اند. در این نرم‌افزارها از روابط ارائه شده توسط پاول^۱ (۱۹۹۱) [۱۲]، برای مدلسازی مسیر حرکت تک گلوله و از روابط مورل^۲ (۱۹۹۳) [۱۳] برای تعیین شکل بار داخل آسیا استفاده شده است.

پاول و نوریک^۳ (۱۹۹۶) حرکت ذرات در آسیای آزمایشگاهی را با استفاده از اشعه X دستگاه آنژوسکوپ دو سطحی که روش دقیقی برای دنبال کردن حرکت ذرات در بار است، بررسی کردند [۱۶]. کیانچی^۴ و مویز^۵ (۲۰۰۶) رفتار بار در آسیای نیمه صنعتی خشک را بر اساس تابعی از سرعت آسیا و پرشدگی، با استفاده از حسگرهای مجاورتی القایی، اندازه‌گیری کردند و موقعیت شانه، پاشنه و نقطه برخورد آبشاری بزرگ با استفاده از این حسگرها را مشخص کردند. مقایسه نتایج حسگرهای القایی و حسگرهای نیروسنج نشان داد حسگرهای القایی در تعیین موقعیت شانه دقیق‌ترند. این محققین در سال ۲۰۰۸ و با استفاده از همین حسگرها تأثیر دانه‌بندی خوراک بر رفتار بار، توان‌کشی و جدانشینی ذرات را مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. حسینی و همکاران (۲۰۱۱) پارمترهای داخلی آسیا را با استفاده از پردازش سیگنال‌های لرزشی/صوتی به دست آوردند [۱۸]. مالکی‌مقدم و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش تصویربرداری از بار در داخل یک آسیای آزمایشگاهی که صفحه جلوی آن شفاف بود دینامیک بار درون آسیا را مورد بررسی قرار دادند و در شرایط عملیاتی مختلف شامل سرعت، میزان پرشدگی و طرح آستر، روابطی را برای موقعیت شانه، پاشنه و نقطه برخورد بار به صورت تابعی از میزان پرشدگی و سرعت دوران آسیا ارائه کردند. این محققان با تعیین موقعیت شانه و پاشنه بار در شرایط عملیاتی مختلف و در نظر گرفتن شکل هلالی بار به جای شکل لوبیایی توصیف دقیق‌تری نسبت به مدل مورل از شکل بار در داخل آسیا ارائه کردند [۲].

با توسعه توان محاسباتی رایانه‌ها، استفاده از روش‌های محاسباتی برای بررسی تاثیر عوامل عملیاتی بر الگوی

آسترهای آسیاهای گردان با هدف استانداردسازی و بهینه‌سازی کارایی آسیاکنی و افزایش عمر آسترها ارائه شد. در ادامه تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مورد استفاده و مراحل کار طراحی آستر ارائه می‌شود.

۲-۱- پیش‌بینی مسیر حرکت گلوله با استفاده از نرم‌افزار GMT

رویکرد غالب در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌سازی نرم (Soft Modeling) برای بررسی پدیده‌های فیزیکی است و مدل‌های فیزیکی ساخته شده تنها برای تعیین پارامترهای اولیه در مدل‌های نرم و تأیید نتایج این مدل‌ها به کار گرفته می‌شوند.

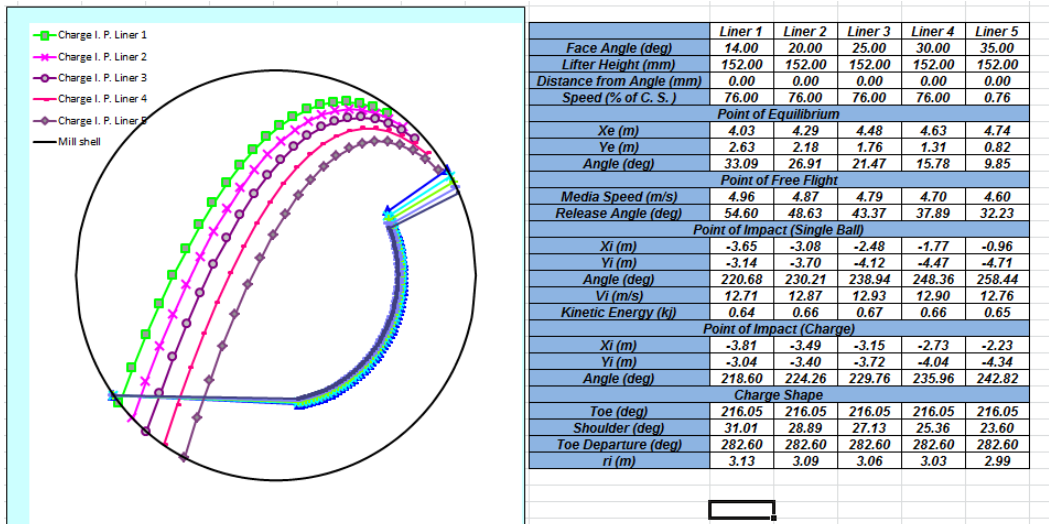
در مرحله اول طراحی، به منظور مدل‌سازی نحوه حرکت بار در داخل آسیا با توجه به طرح بالابر، از برنامه GMT که بر پایه نرم‌افزار صفحه گسترده Microsoft Excel[©] طراحی شده است، استفاده می‌شود. استفاده از نرم‌افزار GMT یکی از آسان‌ترین و ارزان‌ترین راه‌های شناخت مسیر حرکت بار است که با به کارگیری روش‌های تحلیلی ریاضی، مسیر حرکت بار را تخمین می‌زند [۱۵]. جهت کار با این نرم‌افزار، کاربر باید مشخصات هندسه آسیا، زاویه بالابر آسترها و اندازه بزرگ‌ترین ذره موجود در عملیات آسیاکنی را وارد کند. در نهایت نرم‌افزار GMT مسیر حرکت بحرانی‌ترین ذره و موقعیت تجمع مواد در آسیا را محاسبه کرده و در محیط کاربری به نمایش می‌گذارد. شکل ۲ بخش نمایش نتایج شبیه‌سازی این نرم‌افزار را نشان می‌دهد. در بخش نتایج شبیه‌سازی، علاوه بر مسیر حرکت بار خردکننده، اطلاعات مفیدی از قبیل سرعت و انرژی جنبشی بار خردکننده در محل برخورد، مختصات و زاویه برخورد و نسبت فاصله به ارتفاع آستر نیز ارائه می‌شود. در این مرحله، مشخصات کلی چند طرح برگزیده، مشخص می‌شود و به مرحله شبیه‌سازی عددی فرستاده می‌شود.

آورده‌اند که در بعضی از آنها با وجود کهن بودن، جدیدترین تکنیک‌های طراحی و مهندسی به کار گرفته شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین بر اساس سابقه و پیشینه‌های بومی و تاریخی به وجود آمده است و کشور ایران دارای سابقه غنی و تاریخی از لحاظ فناوری‌های بومی است.

در کشور ما تعداد زیادی معدن و کارخانه فرآوری وجود دارد که در آنها از آسیاهای گردان برای خردایش مواد معدنی استفاده می‌شود. مسأله زمان و هزینه گزاف خریداری و تعویض آسترها و مهم‌تر از آن، توقف طولانی مدت خط تولید، همواره موجب نگرانی مدیران کارخانه‌ها بوده است. بنابراین، طرح آستر مناسب، نظارت بر نحوه کارکرد آسترها و تلاش جهت افزایش طول عمر آنها حائز اهمیت است. انتخاب آستر مناسب با توجه به شرایط عملیاتی موجود، مزایایی از جمله، مناسب شدن مسیر حرکت بار، افزایش کارایی خردایش، پرهیز از ایجاد ضربه روی آسترهای جداره، جلوگیری از شکستن گلوله‌ها، پیشینه‌کردن طول عمر آسترها و افزایش ظرفیت آسیا با انتخاب فاصله و ارتفاع مناسب بالابرها را در بر دارد. در نتیجه، دستیابی به فناوری بومی طراحی آستر، منطبق با علم روز و بر مبنای دانش و توانایی‌های داخل کشور ضروری بود. در این تحقیق، خلاصه‌ای از مراحل دستیابی و تجهیزات و نرم‌افزارهای مورد استفاده در این فناوری تشریح می‌شود و در ادامه چند مورد از کاربرد آن در طراحی آسترهای کارخانه‌های صنعتی ذکر می‌شود.

۲- روش، مراحل و ابزارهای بومی در طراحی آستر

از آنجا که مشاهده مستقیم شکل بار و مسیر حرکت آن در آسیاهای صنعتی امکان‌پذیر نیست، جهت بررسی دینامیک بار درون آسیا، ترکیبی از روش‌های فیزیکی و تحلیلی برای تعیین شکل بار استفاده شد. در این فناوری با بهره‌گیری از تجهیزات و نرم‌افزارهای طراحی و ساخته شده داخلی، یک بسته تخصصی و دانش‌بنیان در زمینه طراحی



شکل ۲: بخش نمایش نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار GMT

کنترلی، ابزاربندی شده‌اند (شکل ۳-الف). جهت بررسی تأثیر آستر بر حرکت بار و با توجه به اینکه برای انجام تحقیق از یک آسیای مدل استفاده می‌شود که ابعاد کوچک‌تری نسبت به آسیای واقعی دارد، لذا از الگوی کوچک مقیاس شده آسترهای نو و ساییده شده استفاده می‌شود (شکل ۳-ب). جنس آسترهای مدل، از لاستیک پلی‌ارتان انتخاب شد. دلیل انتخاب این جنس به جای فولاد، دقت بالا، ارزان بودن و ماشین‌کاری آسان آن است که در تهیه مدل آسترهای صنعتی، اهمیت زیادی دارد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، یک دیواره این آسیای مدل، شفاف است که امکان مشاهده مستقیم وضعیت حرکت تک گلوله و قابلیت عکس و فیلم‌برداری از داخل آسیا را، فراهم می‌کند. با استفاده از سیستم کنترلی به کار گرفته شده در این آسیای مدل، این امکان وجود دارد که آسیا در شرایط مختلف عملیاتی کار کند.

۲-۴- بسته اندازه‌گیری سایش آستر

دقیق‌ترین روش (و نه ساده‌ترین) برای پایش نحوه سایش آسترها در آسیاهای صنعتی، اندازه‌گیری مستقیم است. برای پایش نحوه سایش آسترها، باید نظارت و بررسی دقیقی در طی مراحل نصب آسترها صورت گیرد و تاریخ اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول مدت عملیات همراه با ساعت کارکرد و تناژ مواد آسیا شده در هر مرحله با دقت ثبت گردد. علاوه بر موارد مشاهده شده توسط فرد اندازه‌گیری کننده در مورد وضعیت ظاهری آسترها از نظر وضعیت سایش و ترک‌ها و شکستگی‌های آنها نیز در مرحله بهینه‌سازی دارای اهمیت است. دو روش برای اندازه‌گیری

۲-۲- پیش‌بینی مسیر حرکت بار با استفاده از نرم‌افزار KMPC_{DEM}

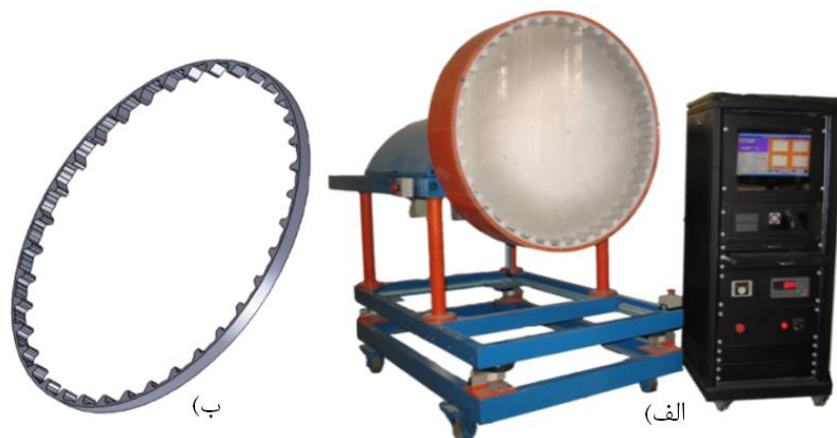
در این مرحله، از شبیه‌سازی‌های روش اجزا گسسته سه‌بعدی (3D-DEM) با استفاده از نرم‌افزار KMPC_{DEM} استفاده می‌شود. این نرم‌افزار در مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر کدنیوسی شده است. جهت شبیه‌سازی لازم است ابتدا تجهیز موردنظر که در اینجا آسیا است، در نرم‌افزارهای طراحی سه‌بعدی نظیر Autocad یا SolidWorks ترسیم شوند. سپس پرونده‌های ایجاد شده با این نرم‌افزارها، در نرم‌افزار KMPC_{DEM} فراخوانی می‌گردند. در مرحله بعد نحوه حرکت این تجهیز و میزان و راستای سرعت آن تعریف می‌شود و در پایان دانه‌بندی ذراتی که قرار است در شبیه‌سازی حضور داشته باشند، تعیین می‌گردد. در نهایت با اجرای نرم‌افزار، مسیر حرکت ذرات در تجهیز مورد نظر به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و نتایج آن به صورت سه‌بعدی و در هنگام اجرای شبیه‌سازی از هر زاویه‌ای در محیط گرافیکی نرم‌افزار KMPC_{DEM} قابل مشاهده است.

۲-۳- مدل فیزیکی آسیای گردان

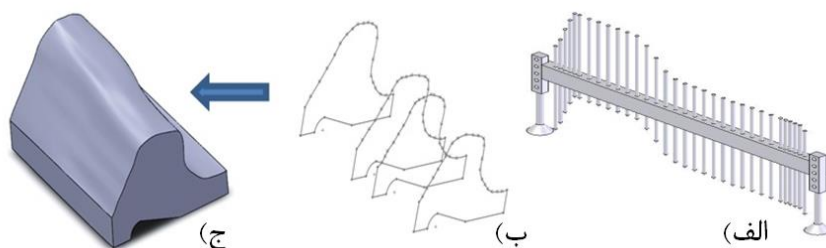
به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده از مدلسازی نرم، تعیین پارامترهای اولیه مورد استفاده در این مدل‌ها و مشاهده واقعی حرکت بار، از یک آسیای مدل با قطر ۱ متر و طول ۱۱ سانتی‌متر استفاده می‌شود. به علاوه، جهت کنترل و ثبت اطلاعات مربوط به شرایط عملیاتی، این تجهیز با استفاده از حسگرها، ابزار نمایشی و عناصر

اندازه‌گیری، می‌توان الگوی آستر را در هر مقطع در طول آستر مشخص کرد. سپس با استفاده از اطلاعات مربوط به مقاطع تهیه شده و با استفاده از یک بسته نرم‌افزاری، الگوی سه‌بعدی آستر را مدلسازی کرد.

پروفیل سایش آستر و ساخت مدل سه‌بعدی آن در هر زمان عملیاتی استفاده می‌شود. در روش اول برای اندازه‌گیری دقیق الگوی سایش آستر، از یک ابزار اندازه‌گیری استفاده می‌شود که به طور خاص برای این کار طراحی شده است (شکل ۴). با استفاده از این ابزار



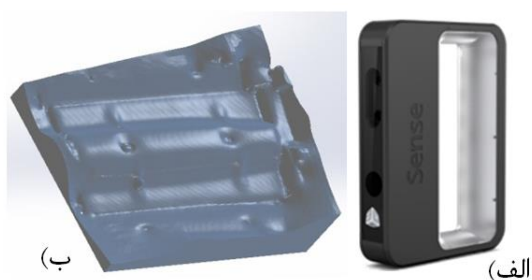
شکل ۳: الف) نمایی از مدل فیزیکی آسیای گردان، ب) نمونه مدل تهیه شده از آستر نو



شکل ۴: الف) ابزار اندازه‌گیری الگوی سایش آسترها، ب) مقاطع اندازه‌گیری شده ج) مدل سه بعدی آستر

مداوم گلوله بر آستر هم می‌توان از روش‌های تحلیلی و هم از روش‌های عملی استفاده کرد. توسط روش تحلیلی مانند آنچه در نرم‌افزار GMT به دست می‌آید، مسیر گلوله‌ها در پیرامون بار، محاسبه می‌شود. مسیر گلوله از متغیرهایی مثل قطر داخل آسترهای جداره، سرعت چرخش آسیا، زاویه رهایی بالابر و ضریب اصطکاک تأثیر می‌پذیرد.

روش دوم، استفاده از اسکنر سه‌بعدی (3D Scanner) برای اندازه‌گیری مشخصات سه‌بعدی آسترها در هر مرحله از زمان کارکرد آنها است. در این روش، ساخت یک مدل سه‌بعدی از آسترها پس از اندازه‌گیری انجام می‌شود. با توجه به اینکه در هر توقف آسیا زمان کوتاهی در دسترس است، این روش امکان اسکن سریع‌تر و دقیق‌تر آستر را در مقایسه با روش اول فراهم می‌کند (شکل ۵-الف). تصویری معمولی از یک آستر اسکن شده در شکل ۵-ب نشان داده شده است. پس از توسعه مدل سه‌بعدی از آسترها، وزن و حجم آستر قابل محاسبه است.



شکل ۵: الف) اسکنر سه‌بعدی (3D) ب) تصویری از یک آستر اسکن شده

۳-ارایه و تحلیل یافته‌ها

نخستین و اساسی‌ترین مرحله طراحی، بررسی مسیر حرکت گلوله در داخل آسیا و طراحی آستر برای رسیدن به مسیر مطلوب است. برای ارزیابی احتمال ایجاد ضربات

استفاده شده است، پرداخته می‌شود و مختصری از نتایج حاصل شده ارائه می‌شود.

۳-۱- مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر

در مدار آسیاکنی شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر از سه آسیای خودشکن خشک با قطر ۹ متر و طول ۲/۰۵ متر استفاده می‌شود که به طور موازی کار می‌کنند. توان این آسیاها ۴۰۲۳ اسب بخار است که با سرعت ثابت ۱۲ دور بر دقیقه (۸۵ درصد سرعت بحرانی) کار می‌کنند. کارایی خردایش در این آسیاها با توجه به تغییر در خصوصیات مواد ورودی کمتر از مقدار در نظر گرفته شده در طرح اولیه بود. به عنوان مثال، P_{80} (اندازه‌ای که ۸۰ درصد ذرات محصول از آن کوچک‌ترند) آسیا، ۵۱۵ میکرون بود که بیشتر از ۴۵۰ میکرون در نظر گرفته شده در طرح است و توان‌کشی نصف توان‌کشی اسمی بود.

شبیه‌سازی مسیر حرکت گلوله‌های ۱۲۰ میلی‌متری در آسیا با استفاده از نرم‌افزار GMT نشان داد که استفاده از طرح آستر قدیم (زاویه صفحه بالابر ۷ درجه) باعث برخورد گلوله‌ها با آسترهای دیواره می‌شود و با افزایش زاویه صفحه بالابر از ۷ به ۳۰ درجه مسیرمناسب بار فراهم می‌شود. نتایج بررسی نشان داد، با این تغییر زاویه، فاصله نقطه برخورد بار تا پاشنه از ۴۰/۱ به ۱۱/۲ درجه در پرتشدگی ۳۰ درصد کاهش می‌یابد که در محدوده بازه ایمن به دست آمد. شکل و مسیر بار واقعی به دست آمده از آسیای مدل و پیش‌بینی شده با استفاده از نرم‌افزار GMT در شکل ۶ نشان داده شده است.

در ادامه از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ برای شبیه‌سازی حرکت بار در این آسیا در ابعاد واقعی و با در نظر گرفتن کلیه شرایط عملیاتی استفاده شد (شکل ۷-الف). همان طور که ملاحظه می‌شود، عمده ذرات که توسط بالابرها حمل شده‌اند، در محلی از آسیا سقوط می‌کنند که موادی روی آستر انباشته نشده‌اند. این امر باعث می‌شود که بخش مهمی از انرژی آسیا، به جای وارد شدن به مواد معدنی موجود در محل پاشنه بار، به بدنه آسیا وارد شود و به هدر رود. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ ، نیز نشان داد اگر زاویه صفحات بالابر آسترها به ۳۰ درجه افزایش یابد، مسیر حرکت مطلوب بار در این آسیا فراهم خواهد شد. با افزایش زاویه صفحه بالابر (شکل ۷-ب)، بخش عمده‌ای از مواد در حال پرواز که در طرح اصلی

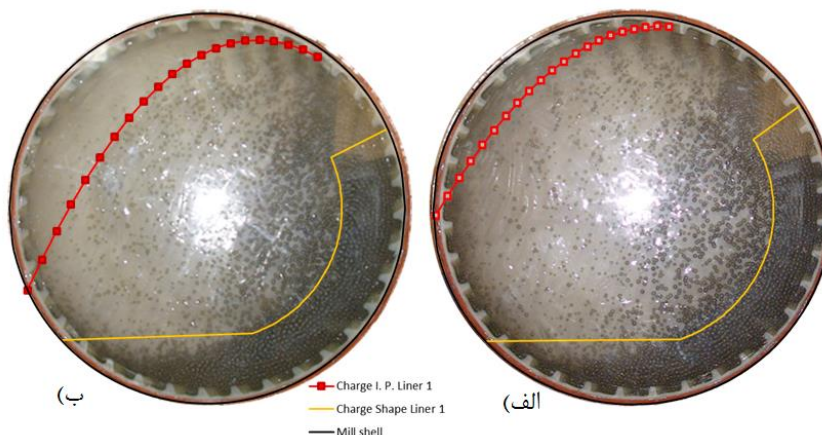
بنابراین، مسیرهای متفاوتی با استفاده از زوایای رهایی مختلف، و در مورد آسیاهایی با سرعت متغیر، سرعت‌های چرخش مختلف به دست می‌آید. سپس مسیرهای محاسبه شده با سطح بار واقعی یا تخمینی در داخل آسیا مقایسه می‌گردد تا تعیین شود که آیا "نقطه سقوط" بار روی آسترهای جداره است یا روی بار؟ با استفاده از آسیای مدل و نمونه کوچک مقیاس شده از آسترها، مسیر حرکت بار در داخل آسیا مورد بررسی قرار می‌گیرد تا مطلوب بودن طرح آستر بررسی گردد.

در یک آسیای گردان واقعی، سطح بار مسطح نیست و ممکن است برجسته یا منبسط باشد. این امر به خاطر تغییر زاویه قرارگیری سطح بار است که می‌تواند در اثر عوامل مختلفی مثل پروفیل آستر، ابعاد خوراک و تشکیل استخر در نزدیکی پاشنه بار رخ دهد. در این حالت روش‌های عددی کامپیوتری مانند استفاده از نرم‌افزار راگ که جزئیات بیشتری را به دست می‌دهند و مدل دقیق‌تری از حرکت بار را فراهم می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین در کنار روش‌های ذکر شده، جهت شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات در آسیا، از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ استفاده گردید.

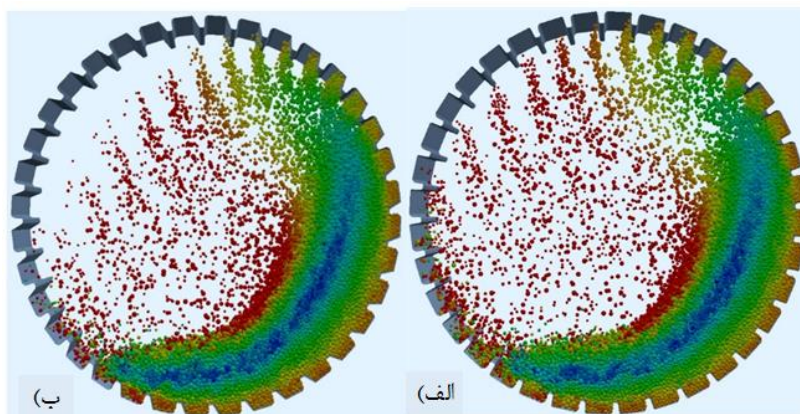
در طی عملیات آسیاکنی و به دلیل سایش، به تدریج الگوی آستر (به خصوص ارتفاع و زاویه صفحه بالابر) دچار تغییر می‌گردد. نتایج بررسی‌های انجام شده و مدل‌سازی سه‌بعدی سایش آستر نشان داده است که سایش آستر در طول آسیا یکنواخت نیست. با در نظر گرفتن این موضوع، امکان بهینه‌سازی طرح آستر بر اساس الگوی سایش آسترها در طول آسیا با توزیع مجدد فلز در بالابرها (افزایش فلز در محل‌های با سایش زیاد و کاهش فلز از محل‌های با سایش کم) وجود دارد. بررسی‌ها نشان داده است که این کار ضمن یکنواخت کردن الگوی آسترهای ساییده شده، موجب کاهش فلز قراضه تا حدود ۲۰ درصد می‌شود. یکی دیگر از مزایای این کار، افزایش عمر آسترها و در نتیجه کاهش زمان خاموشی در آسیاها به دلیل تعویض آستر است. در نتایج به دست آمده مشخص شد که از این طریق امکان افزایش قابل ملاحظه به مدت کارکرد آسترها وجود دارد ضمن اینکه میزان قراضه در هنگام تعویض آسترهای ساییده شده کاهش پیدا می‌کند. در ادامه با توجه به مشخص شدن روند کار در این بسته طراحی، به بررسی چند نمونه مطالعه موردی که در آن از این فناوری طراحی

مواد در حال پرواز که خودشان مستعد خردایش هستند، مواد دیگری که در پاشنه بار حضور دارند را نیز خرد کنند.

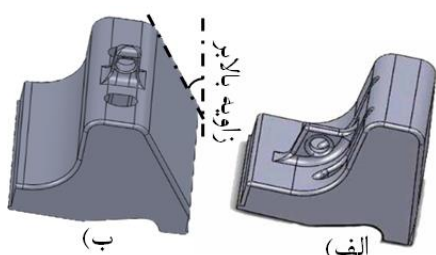
مستقیماً به آسترها برخورد می‌کردند، در این طرح به پاشنه بار برخورد می‌کنند. این باعث می‌شود که علاوه بر



شکل ۶: شکل و مسیر بار واقعی به دست آمده از آسیای مدل و پیش‌بینی شده با استفاده از نرم‌افزار GMT، (الف) آستر طرح قدیم (ب) آستر جدید (سرعت ۸۵ درصد بحرانی، پرشدگی ۲۵ درصد)



شکل ۷: نتایج شبیه‌سازی آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع سنگ آهن گل‌گهر با استفاده از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ (الف) آستر طرح اصلی (ب) آستر جدید



شکل ۸: نمای کلی آسترهای آسیای نیمه‌خودشکن گل‌گهر (الف) طرح اصلی (ب) طرح جدید

نکته مهم دیگر، کاهش انحراف معیار دانه‌بندی و ظرفیت آسیا است که دلیل آن بیشتر شدن توانایی این آسیا در خرد کردن سنگ‌های با ابعاد و دانسیته‌های مختلف است.

در نهایت با درنظر گرفتن شرایط عملیاتی و محدودیت‌های مربوط به حمل و نصب آسترهای این آسیا، نقشه‌های صنعتی طرح نهایی پیشنهادی ترسیم (شکل ۸) و برای ساخت به ریخته‌گری ارسال شد. آسترهای ساخته شده، در یکی از آسیاها نصب گردید و عملکرد آن پایش گردید. در جدول ۱ مقادیر تناژ ورودی و P_{80} (اندازه‌ای که ۸۰ درصد ذرات از آن کوچک‌ترند) آسیا قبل و بعد از تعویض آستر نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با تغییر طرح آسترها، تناژ ورودی آن افزایش یافت، ولی دانه‌بندی محصول آن ثابت ماند. بنابراین، با افزایش نرخ شکست و در نتیجه رشد سازوکار ضربه، می‌توان با حفظ دانه‌بندی، ظرفیت مطلوبی را به دست آورد.

جدول ۱: تاثیر تعویض آستر در تناژ آسیای نیمه‌خودشکن گل‌گهر

دوره زمانی (ماه)	ظرفیت ورودی (t/h)	P ₈₀ (μm)
قبل از تعویض	۴۱۹±۶۷	۵۱۶±۴۴
بعد از تعویض	۴۸۹±۴۶	۵۱۳±۳۶

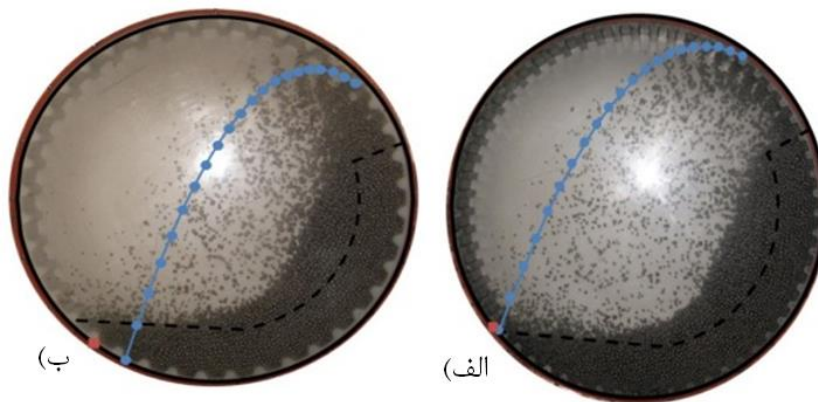
۳-۲- مجتمع مس سرچشمه

کارخانه جدید پرعبارکنی مجتمع مس سرچشمه دارای یک آسیای نیمه‌خودشکن ۹/۷×۴/۸ متری است که توسط دو موتور، هریک با توان ۵۵۰۰ اسب بخار با سرعت ثابتی می‌چرخد. آسترهای جداره آسیا شامل دو ردیف ۶۰ تایی (مجموع ۱۲۰ عدد) بالابر با زاویه بالابری ۱۵ درجه بود. با توجه به برنامه افزایش ظرفیت ورودی به این آسیا، در تحقیقی، تغییر طرح آسترهای جداره جهت افزایش کارایی خردایش در آن مورد بررسی قرار گرفت.

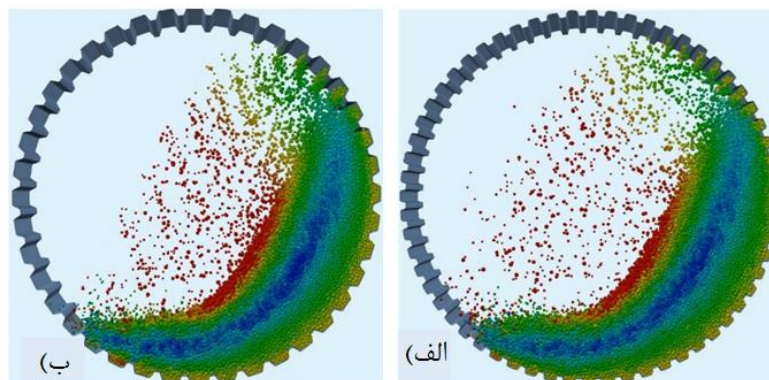
شبیه‌سازی مسیر حرکت بار در نرم‌افزار GMT نشان داد با افزایش زاویه صفحه بالابر آستر از ۱۵ به ۳۰ درجه و تغییر تعداد ردیف آنان از ۶۰ به ۴۰ ردیف، مسیر مناسب

حرکت بار فراهم می‌شود. طرح‌های آستر موجود و پیشنهادی در آزمایشگاه ساخته و در آسیای آزمایشگاهی نصب شدند و تغییرات مسیر حرکت بار و توان کشی آن در شرایط مختلف سرعت و پرشدگی گلوله مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹ وضعیت بار در داخل آسیا و مسیر حرکت گلوله‌ها به همراه نتایج شبیه‌سازی مسیر حرکت بار در نرم‌افزار GMT، برای دو طرح آستر اصلی و پیشنهادی در پرشدگی کلی ۲۰ درصد با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با انجام تغییرات در طرح پیشنهادی، مسیر برخورد آبشاری بزرگ بار از روی آسترها به سمت پاشنه بار متمایل می‌شود و احتمال شکست آستر کاهش می‌یابد.

پس از مطالعه طرح‌های پیشنهادی مختلف و شبیه‌سازی آنان با نرم‌افزار KMPC_{DEM}، در نهایت مشخص شد که اگر زاویه بالابرها از ۱۵ به ۳۰ درجه و تعداد ردیف آنان از ۶۰ به ۴۰ ردیف تغییر داده شوند حرکت مطلوب بار حاصل خواهد شد (شکل ۱۰). تقریباً همه مواد در حال پرواز روی پاشنه بار سقوط می‌کنند. به عبارت دیگر، ضربات مستقیم ذرات به آستر به کمترین مقدار ممکن رسیده است.



شکل ۹: مقایسه شکل و مسیر بار (الف) طرح آستر اصلی (ب) طرح آستر پیشنهادی، در پرشدگی ۲۰ درصد



شکل ۱۰: نتایج شبیه‌سازی آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه با آسترهای (الف) طرح اصلی و (ب) طرح پیشنهادی

سختی خوراک ورودی پس از اضافه شدن گلوله ۱۲۵ میلی‌متری در شرایط جدید است.

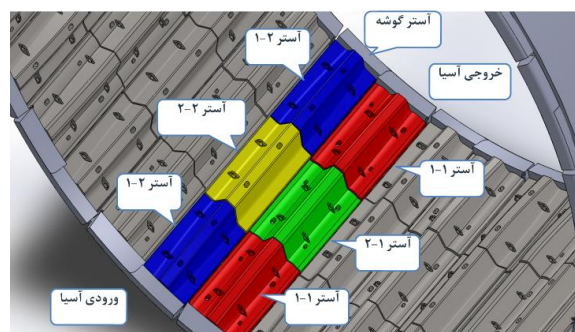
علیرغم افزایش ۲۰ درصدی سهم توقفات مربوط به مدار خردایش نیمه‌خودشکن و نوسان زیاد پرشدگی کلی درون آسیا در این دوره به دلیل راه‌اندازی سیستم کنترل جدید، تعداد آسترهای شکسته از متوسط $4/6$ قطعه به یک قطعه کاهش یافت. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که طول عمر آسترهای جداره طرح جدید ۹۷۵ ساعت نسبت به متوسط پنج دوره قبل افزایش پیدا کرد.

۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

- دستیابی به فناوری بومی طراحی آستر، منطبق با علم روز و بر مبنای دانش و توانایی‌های داخل کشور به دلیل مزایایی از جمله، مناسب شدن مسیر حرکت بار جهت کاهش شکست آسترها و افزایش کارایی خردایش، کاهش زمان تعویض آسترها، جلوگیری از شکستن گلوله‌ها، بیشینه کردن طول عمر آسترها و بیشینه کردن ظرفیت آسیا، ضروری بود. در این فناوری با بهره‌گیری از تجهیزات و نرم‌افزارهای طراحی و ساخته شده داخلی، یک بسته تخصصی و دانش‌بنیان در زمینه طراحی آسترهای آسیاهای گردان ارایه شد.
- برای اجرای طراحی آستر، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز مسیر حرکت بار در داخل آسیا، طرح آستر جدید که مسیر مناسب برای گلوله را در داخل آسیا فراهم می‌کند، به دست می‌آید. در مرحله بعد با کمک آسیای مدل، مناسب بودن طرح تایید و نقشه‌های ساخت تهیه می‌شود. پس از ساخت و نصب آسترهای جدید، ضمن بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، وضعیت سایش آسترهای جداره با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مخصوص ثبت و با تهیه مدل سه‌بعدی از آسترها، طرح آستر به منظور افزایش عمر آن و کاهش میزان قراضه، بهینه‌سازی می‌شود و طرح آستر جدید برای ساخت ارائه می‌گردد.
- در مرحله اول طراحی، به منظور مدلسازی نحوه حرکت بار در داخل آسیا با توجه به طرح بالابر، از برنامه GMT که بر پایه‌ی نرم‌افزار صفحه گسترده

بررسی وضعیت سایش آسترهای دوره قبل نشان داد، سایش آسترها در طول آسیا به صورت غیریکنواخت است و بیشترین مقدار سایش در فاصله ۲/۷۵-۱/۲۵ متری طول آسیا رخ داده است. جهت رفع مشکل، ارتفاع بالابر در این قسمت افزایش داده شد تا در هنگام تعویض آستر، پروفیل یکنواختی داشته باشد و میزان قراضه فلز کمینه شود. بنابراین با توزیع فلز از مناطقی با نرخ سایش کم به مناطقی با نرخ سایش زیاد، در طرح جدید ارتفاع بالابر آستر اول از میزان ۱۲ سانتی‌متر شروع و تا فاصله ۱ متر از ابتدای آسیا به صورت خطی تا ۲۰ سانتی‌متر افزایش داده شد و به صورت متقارن برای سمت خروجی نیز در نظر گرفته شد.

بنابراین با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت‌های عملیاتی، نقشه صنعتی طرح پیشنهادی این آسترها ترسیم (شکل ۱۱) و برای ساخت به ریخته‌گری ارسال شد. از آنجا که این آسیا برای نصب ۶۰ ردیف آستر ساخته شده بود، لذا به منظور تغییر این تعداد به ۴۰ ردیف آستر، به ناچار چهار نوع آستر ساخته شد تا منطبق بر پیچ‌های بدنه آسیا شوند.



شکل ۱۱: طرح نهایی آسترهای پیشنهادی آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه

به دلیل افزایش زاویه بالابر و کاهش احتمال برخورد گلوله به آستر و بدنه آسیا، اضافه کردن گلوله ۱۲۵ میلی‌متر در طرح جدید آسترها امکان‌پذیر گردید. متوسط نرخ خوراک ورودی به آسیای نیمه‌خودشکن در طرح جدید نشان‌دهنده افزایش نرخ خوراک ورودی از ۸۶۰ به ۸۷۸ تن بر ساعت پس از اضافه شدن گلوله ۱۲۵ میلی‌متر در طرح جدید بدون تغییر بارز در اندازه محصول بود. مقایسه مقدار نوسان تناژ دو دوره قبل و دوره اخیر آسیا نشان داد انحراف معیار از ۱۰۲ به ۷۳ تن بر ساعت کاهش یافت که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بیشتر آسیا در برابر نوسان

مراجع

- [1] Wills, B. A., & Finch J. A. (2016). Will's mineral processing technology (Eighth Edition). Elsevier.
- [2] Maleki-Moghaddam, M.; Yahyaei, M.; & Banisi, S. (2013). A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills. *Minerals Engineering*, 46-47, 157-166.
- [3] Royston, D. (2007). Semi-autogenous grinding (SAG) mill liner design and development. Vol. 24, No. 3.
- [4] Parks, J.L., Kjos, D.N. (1989). Liner Design, Materials and Operating Practices for Large Primary Mills. *International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology*, vancouver, pp.565-580.
- [5] Hosseini P., Martins S., Martin T., Radziszewski P., & Boyer F. R. (2011). Acoustic emissions simulation of tumbling mills using charge dynamics. *Minerals Engineering*, 24, 1440-1447.
- [6] Kalala, T. J., Breetzke, M., & Moys, M. H. (2008). Study of the influence of liner wear on the load behavior of an industrial dry tumbling mill using the Discrete Element Method (DEM). *International Journal of Mineral Processing*, 86, 33-39.
- [7] Pérez-Alonso, C., Delgadillo, J.A. (2012). Experimental validation of 2D DEM code by digital image analysis in tumbling mills. *Minerals Engineering*. 25, 20-27.
- [8] Banisi, S., & Hadizadeh, M. (2007). 3-D liner wear profile measurement and analysis in industrial SAG mills. *Minerals Engineering*. 20, 132-139.
- [9] McIvor, R. E. (1983, Jun.). Effect of speed and liner configuration on ball mill performance. *Mining Engineering*, 617-622.
- [10] Powell, M. S., McBride, A.T. (2006). What is required from DEM simulations to model breakage in mills. *Minerals Engineering* 19, 1013-1021.
- [11] Rajamani, R. (2006). Semi-Autogenous mill optimization with DEM simulation software. *Advances in Comminution*, SME Publication, Part 4, p.p. 383-39.
- [12] Powell, M.S. (1991). The Effect of Liner Design on the Motion of the Outer Grinding Elements in a Rotary Mill. *International Journal of Mineral Processing*. 31: p. 163-193.
- [13] Morrell, S. (1993). The prediction of power draw in wet tumbling mills. Doctorate Thesis, University of Queensland, Australia.

Microsoft Excel[®] طراحی شده است، و روش اجزا گسسته سه‌بُعدی (3D-DEM) استفاده می‌شود.

- به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده از مدلسازی نرم، تعیین پارامترهای اولیه مورد استفاده در این مدل‌ها و مشاهده واقعی حرکت بار، از یک آسیای مدل با قطر ۱ متر و طول ۱۱ سانتی‌متر استفاده می‌شود.
- برای پایش نحوه سایش آسترها، دو روش برای اندازه‌گیری پروفیل سایش آستر و ساخت مدل سه‌بُعدی آن در هر زمان عملیاتی استفاده می‌شود.
- نتایج حاصل از شبیه‌سازی آسترهای آسیاهای خودشکن مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر نشان داد با افزایش زاویه صفحه بالابر از ۷ به ۳۰ درجه مسیر مناسب بار فراهم می‌شود. پس از نصب آستر جدید در آسیا، ظرفیت آسیا ۱۷ درصد افزایش یافت و انحراف معیار دانه بندی و ظرفیت آسیا کاهش یافت.
- شبیه‌سازی مسیر حرکت بار در آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه نشان داد با افزایش زاویه صفحه بالابر آستر از ۱۵ به ۳۰ درجه و کاهش تعداد ردیف بالابرها از ۶۰ به ۴۰ مسیر مناسب حرکت بار فراهم می‌شود. طرح‌های پیشنهادی نهایی با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و شرایط عملیاتی، ترسیم و جهت ساخت به ریخته‌گری ارسال شد. تعویض آسترهای آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه متوسط نرخ خوراک ورودی به آسیا را از میزان ۸۶۰ به ۸۷۸ تن بر ساعت بدون تغییر بارز در اندازه محصول، افزایش داد. تعداد شکست آسترها نیز از متوسط ۴/۲ قطعه به یک قطعه، کاهش یافت.

۵- سپاسگزاری

بدین‌وسیله از تعداد زیادی از اعضای مرکز تحقیقات کاشی‌گر به خصوص دکتر هادی‌زاده، دکتر یحیایی، مهندس قاسمی، مهندس ارغوانی و مهندس حسنخویی که در طول ۱۵ سال گذشته برای توسعه این فناوری زحمات زیادی کشیده‌اند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

Method", Vision of Engineering Analysis and Simulation: NAFEMS Company, Developer of EDEM Software, 9-30.

[26] Mohamadi, S., 2003. Discontinuum Mechanics Using Finite and Discrete Elements, WIT Press / Computational Mechanics.

[27] Ghasemi, A., Mousavi, O., and Banisi, S., 2014. "Effect of Time Step on the Accuracy of DEM Calculation", In XXVII IMPC, Santiago, Chile.

[14] Powell, M.S., Smit, I., Radziszewski, P., Cleary, P., Rattray, B., Eriksson, K., Schaeffer, L. (2006). The Selection and Design of Mill Liners. In Advances in Comminution, Ed. S.K. Kawatra. ISBN-13: 978-0-87335-246-8, Society for Mining, metallurgy, and exploration, Inc., Colorado, USA. pp. 331-376.

[15] Yahyaei, M., Banisi, S., (2010). Spreadsheet-based modeling of liner wear impact on charge motion in tumbling mills. Minerals Engineering 23 (I), 1213–1219.

[16] Powell, M. S. & Nurick, G.N. (1996). A study of charge motion in rotary mills part 3— Analysis of results. Minerals Engineering, Volume 9, Issue 4, Pages 399-418.

[17] Kiangi, K. & Moys, M.H. (2006). Measurement of load behaviour in a dry pilot mill using an inductive proximity probe, Minerals Engineering, 19 (13), 1348–1356.

[18] Hosseini P., Martins S., Martin T., Radziszewski P., Boyer F. R. (2011). Acoustic emissions simulation of tumbling mills using charge dynamics, Minerals Engineering, 24, 1440–1447.

[19] Rajamani, R., Joshi, A.D., and Mishra, B.K., 2002. "Simulation of industrial SAG mill charge motion in 3-D space", In 2002 SME Annual Meeting, Phoenix. SME Publication, Arizona.

[20] Bian, X., Wang, G., Wang, H., Wang, S. and Lv W., 2017. "Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation", Minerals Engineering, 105, pp. 22–35.

[21] 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, pp. 42–62.

[22] Xu, L., Luo, K. and Zhao Y., 2018. "Numerical prediction of wear in SAG mills based on DEM simulations", Powder Technology, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.004>

[23] N. Djordjevic, R. Morrison, and B. Loveday, 2006. "Modelling comminution patterns within a pilot scale AG/SAG mill", Minerals Engineering, 19 (1), pp. 1505-1516.

[24] N. Djordjevic, F. N. Shi and R. Morrison, 2004. "Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM", Minerals Engineering, 17 (1), pp. 1135-1142.

[25] Scharpf, D., 2008. "DEM Applications: Simulation of Particulate Solids Handling and Processing Operations Using the Discrete Element

-
- 1- Powell
 - 2- Morrell
 - 3- Nurick
 - 4- Kiangi
 - 5- Moys
 - 6- Rajamani et al.
 - 7- Bian et al.
 - 8- Cleary and Owen
 - 9- Xu et al.
 - 10- Djordjevic et al.