

افزایش کارایی آسترهای آسیای گلوله‌ای با شبیه‌سازی مسیر حرکت گلوله و ماده معدنی در مدار فرآوری مجتمع مس سرچشمه

سعید زارع^۱، مصطفی مالکی مقدم^{۲*}، احسان ارغوانی^۱، علی‌رضا قاسمی^۲، صمد بنیسی^۴

- ۱- کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات فرآوری کاشی‌گر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان
۳- دانشجوی دکترا، مرکز تحقیقات فرآوری کاشی‌گر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
۴- استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

(دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۰۹، پذیرش ۱۳۹۷/۱۱/۲۷)

چکیده

آستر آسیاهای گردان، عامل انتقال انرژی به مواد داخل آسیا است و تاثیر قابل توجهی بر رفتار بار در داخل آسیا دارد. بررسی‌ها نشان داد به دلیل نامناسب بودن طرح آسترهای لاستیکی موجود آسیاهای گلوله‌ای مجتمع مس سرچشمه، سایش و پارگی آن‌ها افزایش و کارایی آسیاکنی کاهش یافته است. این تحقیق با هدف بهبود عملکرد و افزایش عمر آسترها انجام شد. برای بررسی عملکرد طرح‌های اولیه، موجود و پیشنهادی آستر در آسیاهای گلوله‌ای، شبیه‌سازی مسیر حرکت بار با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز حرکت گلوله (GMT) و بار (KMPC_{DEM}) انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از طرح آستر موجود، باعث برخورد بار به بدنه آسیا و بالاتر از پاشنه بار می‌شود. شبیه‌سازی نشان داد که با تغییر زاویه صفحه بالابر از صفر به ۱۵ درجه و افزایش ارتفاع بالابر از ۱۸ به ۲۱ سانتی‌متر، فاصله بین محل برخورد گلوله‌ها با آستر حذف می‌شود و بار روی پاشنه فرود می‌آید. پس از اطمینان از مسیر حرکت مطلوب بار، کار طراحی نقشه‌های صنعتی و ساخت طرح پیشنهادی انجام و در آسیای گلوله‌ای شماره ۴ کارخانه نصب شد. مقایسه دانه‌بندی محصول نشان داد، درصد مواد ریزتر از ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) محصول آسیای ۴ (طرح پیشنهادی) نسبت به آسیای ۳ (طرح موجود)، ۲/۵ درصد افزایش یافت. بررسی زمان کارکرد آسترها نشان داد، با طرح جدید آستر، ساعت کارکرد آسترهای نیمه اول و دوم بدنه به ترتیب ۱۸ و ۲۰ درصد افزایش پیدا کرد.

کلمات کلیدی

آسیای گلوله‌ای، آستر، زاویه بالابر، سرچشمه.

۱- مقدمه

حدود ۶ تا ۷ درصد انرژی کل دنیا صرف صنایع معدنی می‌شود که از این سهم ۴۰ تا ۵۰ درصد آن صرف خریداری می‌شود. به طور کلی، ۳ تا ۵ درصد از این انرژی در آتشباری، ۵ تا ۷ درصد در سنگ‌شکنی و ۹۰ درصد در آسیاکنی مصرف می‌شود. در آسیاکنی ۸۵ درصد انرژی تبدیل به گرما، ۱۲ درصد واکنش شیمیایی، ۲ درصد صدا و تنها بخش کوچکی از انرژی (یک درصد) صرف نرم کردن مواد می‌شود [۱].

آسیاهای گردان مهم‌ترین تجهیزات خریداری در کارخانه‌های فرآوری‌اند که بخش زیادی از انرژی کارخانه را مصرف می‌کنند، به همین دلیل، مطالعه عوامل موثر بر کارایی آن‌ها مهم است. در آسیاهای گردان، انرژی وارد شده از موتور به آسیا (به جز بخش‌هایی که به صورت مختلف تلف می‌شود) صرف حرکت بار می‌شود. جداره داخلی آسیاها با آسترهای قابل تعویضی پوشانده می‌شوند. مقاومت در برابر ضربه، مقاومت در برابر سایش، کمک به حرکت مطلوب بار با کاهش لغزش بین واسطه خریداری و جداره آسیا، کار عمده آسترها است [۲،۳]. در این میان، آسترهای جداره عامل انتقال انرژی به بار آسیا (ماده معدنی و گلوله) است و تاثیر قابل توجهی بر رفتار بار داخل آسیا دارد. به همین دلیل، بررسی اثر آستر بر الگوی حرکت بار آسیا موضوع تحقیقات زیادی بوده است. برای انتخاب طرح مناسب آستر، با توجه به اهداف و شرایط عملیاتی مورد نظر، آگاهی از مسیر حرکت بار داخل آسیا ضروری است. بهترین طرح آستر، طرحی است که مسیر حرکت مطلوب بار را با توجه به اهداف عملیات فراهم کند. مسیر حرکت مطلوب بار مسیری است که علاوه بر بالاروی مناسب، بدون برخورد مستقیم با آسترهای جداره، به پاشنه بار برخورد کند [۴،۵].

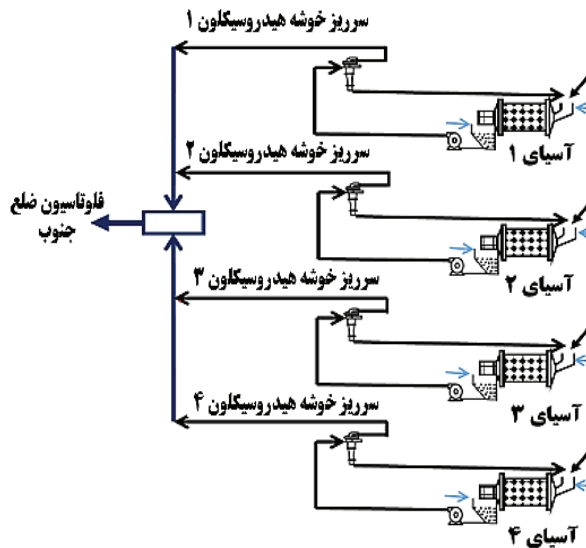
آسترها در طول عملیات آسیاکنی به دلیل برخورد گلوله و مواد معدنی، ساییده می‌شوند و شکل هندسی‌شان تغییر می‌کند. این سایش و تغییر شکل آسترها بر مسیر حرکت بار تاثیر می‌گذارد [۶،۷]. در اکثر موارد در آسیاهای گلوله‌ای، آسترهای لاستیکی به دلیل عمر بیشتر و نصب سریع و آسان، جانشین انواع فولادی شده‌اند، همچنین استفاده از آسترهای لاستیکی تا حد خیلی زیادی آلودگی صوتی را کاهش داده است. در آسترهای لاستیکی هنگامی که نیروی وارده بر آن‌ها کم باشد، آن‌ها متراکم می‌شوند و پس از برداشت نیرو دوباره به حالت اولیه بر می‌گردند. اگر چه زمانی که نیروهای وارده خیلی زیاد باشد یا سرعت مواد هنگام برخورد بالا باشد، نرخ بالای

سایش و ضربه، مانع از استفاده از این نوع آسترها می‌شود [۲]. فهم بهتر ساز و کار انرژی مصرفی و دینامیک بار آسیا می‌تواند منجر به صرفه‌جویی چشم‌گیر انرژی مصرفی شود و با تغییر عواملی مانند سرعت و طرح آستر، افزایش ظرفیت و کارایی انرژی مصرفی و آسان‌تر شدن کنترل قابل دستیابی است [۸]. به دلیل عدم دسترسی مستقیم و آگاهی از شرایط داخل آسیاهای صنعتی، در بیشتر موارد، بررسی عوامل موثر بر مسیر حرکت بار از طریق تحقیقات آزمایشگاهی (فیزیکی) و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری انجام شده است [۹،۱۰].

امروزه با توسعه توان محاسباتی کامپیوترها، استفاده از روش‌های محاسباتی برای بررسی تاثیر عوامل عملیاتی بر الگوی حرکت بار و شکل آن در داخل آسیاها توسعه یافته است. راجامانی و همکارانش^۱ در ادامه تحقیقات خود و پس از شبیه‌سازی‌های روش اجزا گسسته^۲ راگ دوبعدی از راگ سه بعدی^۳ استفاده کردند که به دلیل در نظر گرفتن برهم‌کنش ذرات داخل آسیا در راستای طول آسیا به واقعیت نزدیک‌تر بود [۱۱]. روش اجزای گسسته (راگ)، یک روش عددی قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی مجموعه‌ای از ذرات جدا از هم است و چون حدود ۷۰ درصد از فرآیندهای صنعتی شامل جریان‌های ذره‌ای‌اند، در اکثر صنایع مانند صنایع هسته‌ای، دارویی، نظامی، عمرانی و نیز صنعت فرآوری مواد معدنی کاربرد دارد [۱۷-۱۲].

در راگ، هر ذره با یک سری ویژگی‌های ثابت مانند اندازه، چگالی و مدول الاستیسیته شناخته می‌شود. در زمان شبیه‌سازی با توجه به ویژگی‌های ثابت و قوانین فیزیکی، در هر لحظه خصوصیات متغیر ذرات شامل سرعت، شتاب و موقعیت محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، اساس شبیه‌سازی با راگ بر پایه مدل کردن نیروی متقابل میان ذرات در هر برخورد است که در نهایت موقعیت جدید ذرات در هر لحظه محاسبه می‌شود [۱۸،۱۹].

در پژوهشی، با استفاده از روش DEM، تاثیر میزان پرشدگی گلوله، ارتفاع بالابر 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 [۱۲]. در پژوهش دیگری با انجام شبیه‌سازی به روش 3D-DEM رابطه بین پارامترهای شکل بار و عوامل عملیاتی پرشدگی، ارتفاع بالابر و سرعت آسیا بررسی شد [۱۳]. تاثیر عوامل مختلف بر سایش آسترها و کارکرد آسیا با استفاده از



شکل ۱: مدار آسیاهای گلوله‌ای ضلع جنوب کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه

آسیاهای گلوله‌ای اولیه در این مدار، از نوع آسیاهای سرریز شونده با قطر حدود ۵ متر است که این آسیاها آستر لاستیکی دارند. در جدول ۱ مشخصات آسیا، آستر و خوراک آسیا آورده شده است.

طبق طراحی اولیه، جنس آستر آسیاهای اولیه کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه از فولاد کروم-مولیبدن بوده است (شکل ۲-الف). سر و صدای زیاد آسترهای فولادی، زمان‌بر بودن تعویض آن‌ها، عمر کم و هزینه بالا از جمله مواردی است که باعث تغییر آسترهای فولادی به لاستیکی می‌شود. همانطور که در شکل ۲-ب ملاحظه می‌شود، آسترهای لاستیکی با زاویه بالابری صفر درجه و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

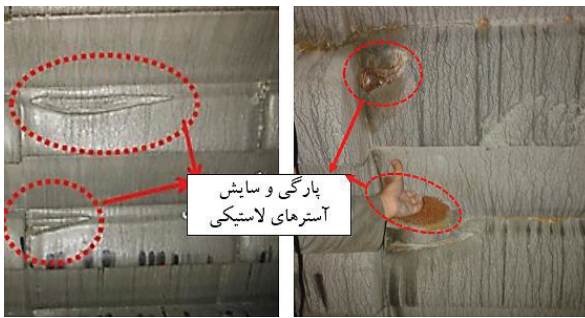
بررسی‌ها نشان داد به دلیل نامناسب بودن طرح آسترهای موجود، برخورد مستقیم بار خردکننده با آسترها اتفاق می‌افتد و همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود باعث سایش و پارگی آن‌ها می‌شود. علاوه بر این، مسیر نامناسب بار باعث اتلاف مقدار زیادی از انرژی خردایش و کاهش کارایی آسیاکنی می‌شود. به همین دلیل، این تحقیق برای بهبود عملکرد و افزایش عمر آسترها انجام شد. در این پژوهش کاربردی با استفاده از شبیه‌سازی مسیر حرکت بار با به کارگیری نرم‌افزارهای GMT و $KMPC_{DEM}$ ، آستر مناسب برای افزایش عمر و کارایی خردایش طراحی شد و پس از ساخت و نصب در آسیا کارایی آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

روش DEM و به کارگیری مدل‌های سایش در تحقیق دیگری توسط زو و همکاران^۶ مورد بررسی قرار گرفت [۱۴]. جورجویپ و همکاران^۷ با استفاده از روش المان گسسته اثر ارتفاع و سرعت آسیا را روی توان کشی آسیا و بارهای ضربه‌ای در یک آسیای خودشکن به قطر ۵ متر بررسی کردند و نشان دادند تعداد و ارتفاع آستر، سرعت آسیا و درصد پرشدگی آسیا تاثیر زیادی در بارهای ضربه‌ای و توان کشی دارند [۱۵، ۱۶].

برای تعیین مسیر حرکت بار در داخل آسیا به صورت تحلیلی و با توجه به مشخصات آستر و شرایط عملیاتی آسیا، یحیایی و بنیسی^۸ (۲۰۱۰) برنامه‌ای را با عنوان GMT^۹، بر پایه نرم‌افزار صفحه گسترده^{۱۰} توسعه دادند. در این نرم‌افزار از روابط ارایه شده توسط پاول^{۱۱} [۲۰]، برای مدلسازی مسیر حرکت تک گلوله و از روابط مورل^{۱۲} [۲۱] برای تعیین شکل بار داخل آسیا استفاده شده است [۱۰]. در تحقیق دیگری با استفاده از روش تصویربرداری از بار در داخل یک آسیای آزمایشگاهی، دینامیک بار درون آسیا مورد بررسی قرار گرفت 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، ارایه شد. در این تحقیق، با تعیین موقعیت شانه و پاشنه بار در شرایط عملیاتی مختلف توصیف دقیق‌تری نسبت به مدل مورل از شکل بار در داخل آسیا ارایه شد و نسخه دوم از نرم‌افزار GMT بر این مینا توسعه داده شد [۵].

۱-۱- مدار آسیاکنی اولیه مجتمع مس سرچشمه

مدار آسیاکنی اولیه در کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه از دو بخش ضلع شمال و ضلع جنوب تشکیل می‌شود. شکل ۱ مدار آسیاکنی ضلع جنوب را نشان می‌دهد که از ۴ آسیای گلوله‌ای با خوشه هیدروسیکلون مربوط به صورت مدار بسته، تشکیل شده است. مدار آسیاکنی ضلع شمال همانند مدار آسیاکنی ضلع جنوب است. مواد خروجی از هر آسیا وارد یک سرنده گردان می‌شود. مواد درشت‌تر از روزه‌های سرنده به عنوان ذرات با ابعاد بحرانی از مدار خارج و ذرات عبوری از روزه‌های سرنده وارد مخزن پمپ هیدروسیکلون می‌شوند و با هدف طبقه‌بندی به خوشه هیدروسیکلون مربوط پمپ می‌شود. ته‌ریز هیدروسیکلون به صورت ثقلی وارد آسیا می‌شود. سرریز هیدروسیکلون‌های چهار آسیا (هر ضلع) با درصد جامد ۲۸ با هم مخلوط شده و به سمت مدار فلوتاسیون هدایت می‌شود [۲۲].



شکل ۳: پارگی آسترهای لاستیکی در اثر برخورد مستقیم گلوله

۲- روش انجام تحقیق

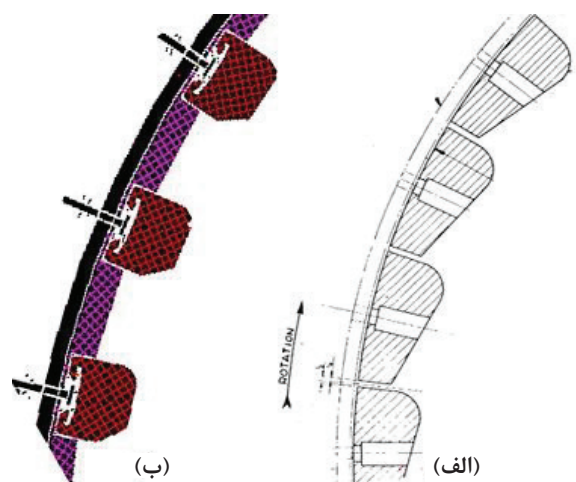
برای تعیین مسیر حرکت بار می‌توان از روش‌های عددی و تحلیلی و یا مدلسازی‌های فیزیکی مانند آسیای آزمایشگاهی استفاده کرد. برای بررسی عملکرد آستر در طرح‌های اولیه، موجود و پیشنهادی در آسیاهای گلوله‌ای، در این تحقیق، شبیه‌سازی مسیر حرکت بار با استفاده از نرم‌افزارهای GMT و $KMPC_{DEM}$ انجام گرفت. با استفاده از این نرم‌افزارها، مسیر حرکت بار خردکننده، شکل قرارگیری آن داخل آسیا و همچنین محل برخورد بار، برای آسترهای مختلف، شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی‌ها بر اساس شرایط عملیاتی، سرعت آسیا معادل ۷۴ درصد سرعت بحرانی و پرشدگی آن برابر ۳۵ درصد در نظر گرفته شد.

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

رویکرد غالب در سال‌های اخیر استفاده از مدلسازی نرم برای بررسی پدیده‌های فیزیکی است و مدل‌های فیزیکی ساخته شده تنها برای تعیین پارامترهای اولیه در مدل‌های نرم و تایید نتایج این مدل‌ها به کار گرفته می‌شود. در این تحقیق برای مدلسازی نحوه حرکت بار در داخل آسیا با توجه به طرح بالابر، از برنامه GMT که بر پایه نرم‌افزار صفحه گسترده طراحی شده است، استفاده شد. 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 [۲۱]. برای 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 می‌کند و در محیط کاربری به

جدول ۱: مشخصات آسیاهای گلوله‌ای اولیه کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه (طبق طرح)

ابعاد ۵۰۲۹×۸۲۳۰ (قطر \times طول)	اندازه (میلی‌متر)	آسیا
نوع سرریز شونده	نوع	
۳۳۵۰	حداکثر توان کشی (کیلووات)	
۱۳/۹۸	سرعت (RPM)	
۴۰	پرشدگی حداکثر گلوله (درصد)	آستر
۳۴۰ قطعه	تعداد کل در آسیا	
۱۸۰	ارتفاع (میلی‌متر)	
۰	زاویه بالابر	
۲۰۸	عرض (میلی‌متر)	خوراک
سنگ معدن مس	نوع ماده معدنی	
۲۲۴	تناژ خشک (تن / ساعت)	
۸۰ درصد کوچکتر از ۱۲/۷ میلی‌متر ۲۴ درصد کوچکتر از ۷۵ میکرون	دانه‌بندی ورودی و خروجی	
۲/۸	چگالی سنگ (گرم / سانتی‌متر مکعب)	



شکل ۴: شمای آسترهای بدنه آسیا، الف) طرح اول و ب) طرح موجود

تعیین دانه‌بندی خوراک و محصول آسیا در طول یک دوره کاری، وضعیت کارکرد و عمر آستر موجود (آسیای ۳) و پیشنهادی (آسیای ۴) مورد مقایسه قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

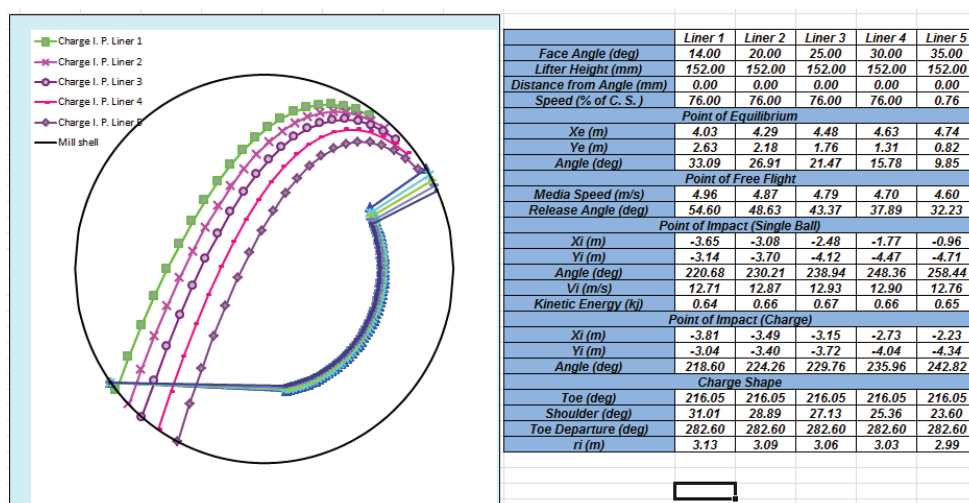
برای طراحی آستر مناسب آسیای گلوله‌ای، شکل و مسیر حرکت بار در آسیا با به کارگیری ابتدا طرح اولیه فولادی و سپس طرح موجود بررسی شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۵ ارایه شده است که رنگ‌های قرمز و آبی در این شکل به ترتیب بیانگر مسیر حرکت بار خردکننده و شکل بار داخل آسیا است. ساعت ۳ به عنوان نقطه صفر دستگاه انتخاب و تمامی زوایا بر اساس آن و برخلاف جهت عقربه‌های ساعت اندازه‌گیری شده است. برای مقایسه با وضعیت موجود، شبیه‌سازی مسیر حرکت بار مربوط به آسترهای طرح اولیه با استفاده از نرم‌افزار GMT انجام شد (شکل ۵- الف). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مسیر حرکت ذرات به نحو مطلوبی روی پاشنه بار است و خردایش مناسبی با استفاده از این آستر حاصل می‌شود اما به دلایل یاد شده در حال حاضر از این آستر استفاده نمی‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با استفاده از طرح آستر موجود، محل برخورد بار به دیواره آستر ۵ درجه بالاتر از پاشنه است (شکل ۵- الف). با توجه به اینکه مسیر بار نمایش داده شده مربوط به توده ذرات و آبشاری بزرگ است، امکان برخورد گلوله در بالاتر از این نقطه وجود دارد و این گلوله‌ها به جای برخورد به ذرات و خردایش آن‌ها به آسترها آسیب می‌رسانند.

نمایش می‌گذارد. شکل ۴ 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 ارایه می‌شود.

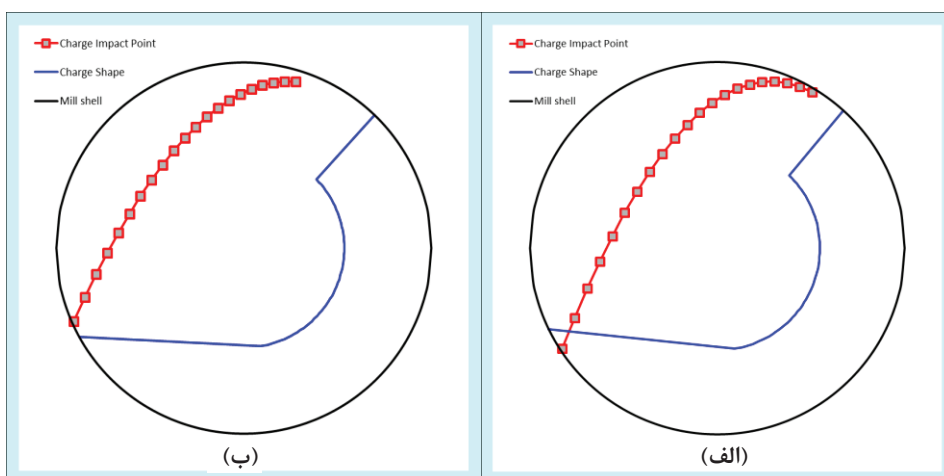
۲-۲- پیش‌بینی مسیر حرکت بار با استفاده از نرم‌افزار KMPC_{DEM}

در این تحقیق، از شبیه‌سازی‌های روش اجزا گسسته راگ سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار KMPC_{DEM} استفاده شد. این نرم‌افزار در مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر کد نویسی شده است. برای شبیه‌سازی تجهیزات با آن لازم است ابتدا تجهیز مورد نظر که در اینجا آسیا است، در نرم‌افزارهای طراحی سه‌بعدی مانند Autocad یا SolidWorks ترسیم و سپس پرونده‌های ایجاد شده با این نرم‌افزارها، در نرم‌افزار KMPC_{DEM} فراخوانی شوند. در مرحله بعد نحوه حرکت این تجهیز و میزان راستای سرعت آن تعریف شده است و در پایان دانه‌بندی ذراتی که قرار است در شبیه‌سازی وجود داشته باشند، تعیین می‌شود. 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.

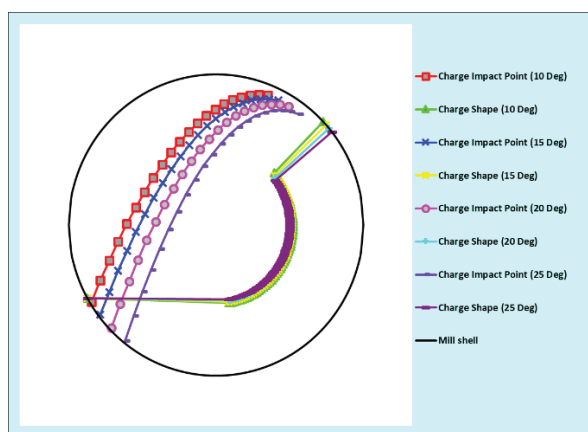
بعد از انجام شبیه‌سازی‌ها و بررسی داده‌ها، آستر پیشنهادی طراحی، ساخت و نصب شد. پس از نصب، با نمونه‌برداری و



شکل ۴: بخش نمایش نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار GMT



شکل ۵: شبیه‌سازی مسیر حرکت بار و تک گلوله برای الف) آسترهای فولادی و ب) لاستیکی با استفاده از نرم‌افزار GMT



شکل ۶: تاثیر زاویه صفحه بالابر بر مسیر حرکت بار در آسیا (پرشدگی کلی ۳۵ درصد)

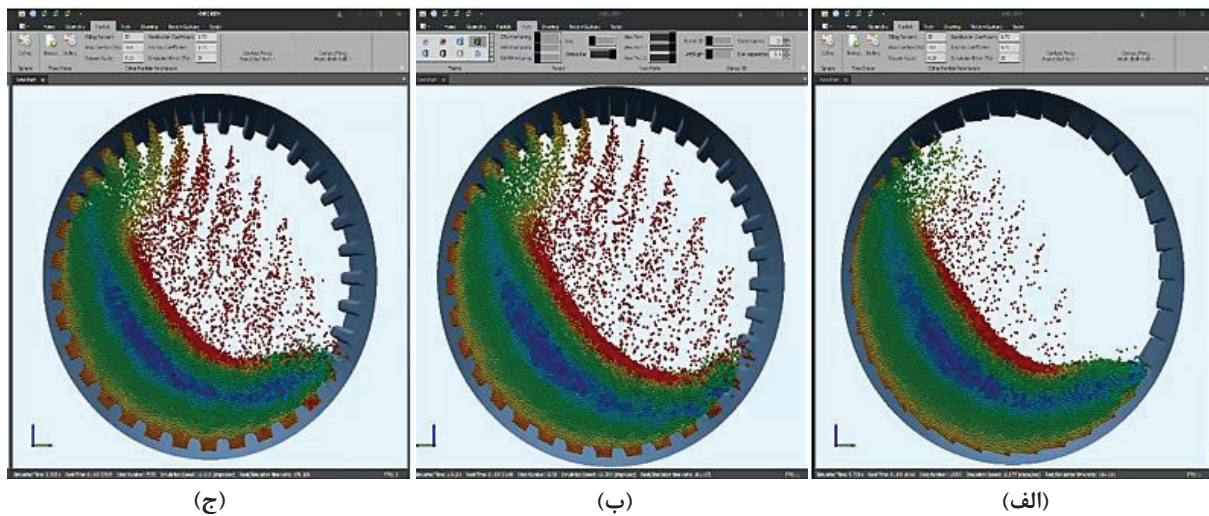
است. همان‌طور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود در زمان استفاده از طرح آستر فلزی، عمده ذراتی که با بالابرها بالا رفته‌اند، در محل پاشنه بار سقوط می‌کنند. این مسیر باعث می‌شود که از شکستگی آسترهای فلزی در اثر برخورد بار به بدنه آسیا جلوگیری و باعث بهبود خردایش شود.

همان‌طور که در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود در زمان استفاده از طرح موجود، عمده ذراتی که به وسیله بالابرها بالا رفته‌اند، در محلی از آسیا سقوط می‌کنند که موادی روی آستر انباشته نشده‌اند. این مسیر 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 هدر رود. اگر این بخش از انرژی پتانسیل ذرات در موقع

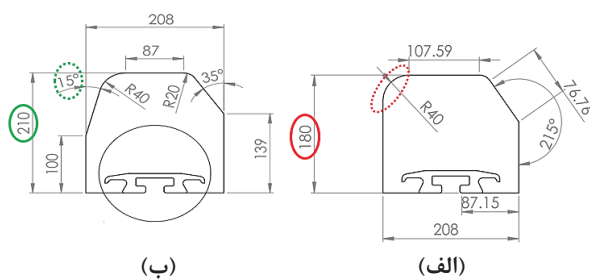
از آنجایی که زاویه صفحه بالابر (اندازه‌گیری شده نسبت به محور عمودی) بیشترین تاثیر را در مسیر حرکت بار دارد و از سوی دیگر ارتفاع بالابر در عمر آستر تاثیر زیادی دارد، تصمیم گرفته شد تا زاویه بالابر افزایش داده شود. با توجه به اینکه با افزایش زاویه صفحه بالابر، سایش آستر افزایش و عمر آن کاهش می‌یابد. برای غلبه بر این مشکل و افزایش عمر، ارتفاع آستر در طرح پیشنهادی افزایش داده شد. برای به دست آوردن مسیر حرکت مناسب برای گلوله، با توجه به محدودیت‌های یاد شده، زاویه بالابر به تدریج از صفر تا ۲۵ درجه افزایش داده شد و مسیر حرکت بار در داخل آسیا با استفاده از نرم‌افزار GMT شبیه‌سازی شد تا زاویه مناسب به دست آید.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد با تغییر زاویه صفحه بالابر از صفر به ۱۵ درجه، فاصله بین محل برخورد گلوله‌ها با آستر در پرشدگی کلی ۳۵ درصد حذف می‌شود و بار روی پاشنه فرود می‌آید. تاثیر افزایش زاویه صفحه بالابر بر مسیر حرکت بار در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع بالابر از ۱۸ به ۲۱ سانتی‌متر، کاهش عمر ناشی از این افزایش صفحه بالابر جبران می‌شود.

با هدف دستیابی به نتایج مطمئن‌تر، شبیه‌سازی حرکت بار در آسیای گلوله‌ای برای آسترهای فولادی (طرح اولیه)، طرح موجود لاستیکی و طرح پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ انجام گرفت. از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی حرکت بار در این آسیا در ابعاد واقعی و با در نظر گرفتن کلیه شرایط عملیاتی استفاده شد. در شبیه‌سازی، مسیر حرکت ذراتی که بیش‌ترین بالابری را در آسیا دارند، حایز اهمیت



شکل ۷: شبیه‌سازی مسیر حرکت بار در آسیا با استفاده از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ برای (الف) آسترهای فولادی، (ب) موجود و (ج) پیشنهادی



شکل ۸: مقطع، (الف) طرح موجود، (ب) طرح پیشنهادی

۳-۱- نتایج حاصل از نصب آسترهای با طرح پیشنهادی

طرح پیشنهادی برای آسیای گلوله‌ای اولیه ۴ به صورت آزمایشی نصب شد (شکل ۹). هر قطعه از آسترهای ساخته شده جدید نسبت به طرح قبل، ۴ کیلوگرم سنگین‌تر بود و با توجه به اینکه تعداد کل آسترهای بدنه، ۳۶۰ قطعه است، در مجموع ۱٫۴۴ تن به وزن آسیا اضافه شد. این مقدار افزایش وزن، نسبت به وزن آسیا و گلوله‌های داخل آسیا (۳۰۰ تن) قابل صرف نظر کردن است.

بعد از نصب طرح پیشنهادی آستر آسیای گلوله‌ای اولیه ۴، عملکرد این آستر از نظر عمر، کارایی خردایش، تعمیرات و نگهداری مورد پایش قرار گرفت.

برای مقایسه دانه‌بندی محصول، از آسیای گلوله‌ای اولیه ۳ (طرح موجود) و اولیه ۴ (طرح پیشنهادی) در یک دوره عمر آسترها نمونه‌گیری انجام شد. میانگین دانه‌بندی خوراک هر دو آسیا ۷۸ درصد کوچکتر از ۱۲۷ میلی‌متر بود. با بررسی

سقوط به خود ذرات وارد می‌شد، باعث بهبود بخش خردایش می‌شد. در همین راستا، طرح‌های جایگزین آسترها پیشنهاد و با استفاده از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ ، با در نظر گرفتن طرح اصلی (شکل ۷-ب)، شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش زاویه صفحه بالابر (شکل ۷-ج)، بخش عمده‌ای از مواد در حال پرواز که در طرح اصلی مستقیماً به آسترها برخورد می‌کردند، در این طرح به پاشنه بار برخورد می‌کنند که باعث می‌شود، علاوه بر مواد در حال پرواز که خودشان مستعد خردایش‌اند، مواد دیگری که در پاشنه بار وجود دارند را نیز خرد کنند. در نهایت با بررسی نتایج مشخص شد که اگر زاویه صفحات بالابر آسترها به ۱۵ درجه و ارتفاع به ۲۱ سانتی‌متر افزایش یابد، مسیر حرکت مطلوب بار در این آسیا فراهم خواهد شد.

همان‌طور که در شبیه‌سازی از طریق نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ و GMT ملاحظه شد، بعد از تغییر طرح آستر و افزایش زاویه صفحه بالابر آستر، حرکت بار به نحوی شد که محل برخورد آبشاری بار به محل پاشنه بار تغییر کرد. در نتیجه بخش اعظم خردایش که ناشی از ضربات واسطه خردایش است، علاوه بر خرد شدن خود باعث خردایش سایر مواد شدند. علاوه بر این، با افزایش ارتفاع بالابر نیز پیش‌بینی می‌شود عمر آستر افزایش یابد. در نهایت با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی و محدودیت‌های مربوط به حمل و نصب آسترهای آسیا، نقشه‌های صنعتی طرح پیشنهادی ترسیم (شکل ۸) و برای ساخت به شرکت سازنده ارسال شد.

و پارگی آن‌ها را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مسیر نامناسب بار باعث اتلاف مقدار زیادی از انرژی خریدایش و کاهش کارایی آسیاکنی می‌شود.

۲- برای بررسی عملکرد آستر در طرح‌های اولیه، موجود و پیشنهادی در آسیاهای گلوله‌ای، در این تحقیق، شبیه‌سازی مسیر حرکت بار با استفاده از نرم‌افزارهای GMT و $KMPC_{DEM}$ انجام گرفت و مشخص شد با طرح آستر موجود، محل برخورد بار به بدنه آسیا بالاتر از پاشنه است.

۳- نتایج شبیه‌سازی نشان داد با تغییر زاویه صفحه بالابر از صفر به ۱۵ درجه، فاصله بین محل برخورد گلوله‌ها با آستر در پرشدگی کلی ۳۵ درصد حذف می‌شود و بار روی پاشنه فرود می‌آید. با افزایش ارتفاع بالابر از ۱۸ به ۲۱ سانتی‌متر، کاهش عمر ناشی از این افزایش صفحه بالابر جبران شد.

۴- پس از اطمینان از مسیر حرکت مطلوب بار، با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی و محدودیت‌های مربوط به حمل و نصب آسترهای آسیا، کار طراحی نقشه‌های صنعتی و ساخت طرح پیشنهادی انجام شد. طرح پیشنهادی برای آسیای گلوله‌ای اولیه ۴ به صورت آزمایشی نصب شد.

۵- برای مقایسه دانه‌بندی محصول، از آسیای گلوله‌ای اولیه ۳ (طرح موجود) و اولیه ۴ (طرح پیشنهادی) در یک دوره عمر آسترها نمونه‌گیری انجام شد. نتایج نشان داد، میانگین محصول آسیای ۳ و ۴ به ترتیب ۲۰٫۷ و ۲۳٫۲ درصد زیر ۷۴ میکرون است.

۶- بررسی زمان کارکرد آسترها نشان داد، با طرح جدید آستر، ساعت کارکرد آستر نیمه اول ۱۸ و نیمه دوم ۲۰ درصد افزایش یافت.

۵- سپاس‌گزاری

از مدیران و کارکنان مجتمع مس سرچشمه به دلیل همکاری در اجرای این تحقیق و همچنین اجازه انتشار این مقاله، تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Manouchehri H. R. (2014). "Changing the game in comminution practices: Vibrocone TM, a new Crusher having grinding performance". In XXVII IMPC, Santiago, Chile, 1-13.
- [2] Wills, B. A., and Finch, J. A. (2016). "Will's Mineral Processing Technology". 8nd ed., Elsevier, pp. 498.

نمونه‌گیری‌ها مشخص شد که میانگین محصول آسیای ۳ و ۴ به ترتیب ۲۰٫۷ و ۲۳٫۲ درصد زیر ۷۴ میکرون (شاخص دانه‌بندی در مجتمع مس سرچشمه) است. این عدد در طرح اصلی کارخانه برابر ۲۴ درصد در نظر گرفته شد و نزدیک شدن دانه‌بندی محصول آسیای ۴ با طرح جدید آستر و بهبود نسبی ۱۲ درصدی، نشان‌دهنده افزایش کارایی خریدایش در این آسیا است.



شکل ۹: نصب آستر طرح پیشنهادی برای آسیای گلوله‌ای اولیه ۴

علاوه بر دانه‌بندی، عمر آسترهای طرح پیشنهادی و موجود مورد بررسی قرار گرفت. برای حذف تاثیر جنس بر عمر آستر، میانگین دوره‌هایی مورد مقایسه قرار گرفت که سازنده آن‌ها، همان سازنده آسترهای طرح پیشنهادی بود. میانگین شش دوره آستر نیمه اول و دوم با طرح موجود به ترتیب برابر ۷۸۲۵ و ۹۱۵۰ ساعت بود. با طرح جدید آستر ساعت کارکرد آستر نیمه اول به ۹۲۶۵ ساعت و نیمه دوم به ۱۱۰۰۰ افزایش یافت. به عبارتی زمان کارکرد نیمه اول ۱۸٫۴ و نیمه دوم ۲۰٫۲ درصد افزایش یافت. با توجه به اینکه، محل برخورد گلوله‌ها از بدنه به پاشنه بار منتقل شد، در نتیجه برخورد بار به بدنه آسیا کمتر شد. علاوه بر این، افزایش ۳ سانتی‌متری ضخامت آسترها خود دلیل دیگری برای افزایش عمر آسترها بود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- بررسی‌ها نشان داد به دلیل نامناسب بودن طرح آسترهای موجود آسیاهای گلوله‌ای مجتمع مس سرچشمه، برخورد مستقیم بار خردکننده با آسترها اتفاق می‌افتد و سایش

- doi.org /10.1016/j.powtec. 2018.02.004.
- [15] Djordjevic, N., Morrison, R., and Loveday, B. (2006). "Modelling comminution patterns within a pilot scale AG/SAG mill". *Minerals Engineering*, 19(1): 1505-1516.
- [16] N. Djordjevic, Shi, F. N., and Morrison, R. (2004). "Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM". *Minerals Engineering*, 17(1): 1135-1142.
- [17] Scharpf, D. (2008). "DEM Applications: Simulation of Particulate Solids Handling and Processing Operations Using the Discrete Element Method". Vision of Engineering Analysis and Simulation: NAFEMS Company, Developer of EDEM Software, 9-30.
- [18] Mohamadi, S. (2003). "Discontinuum Mechanics Using Finite and Discrete Elements". WIT Press / Computational Mechanics, pp. 328.
- [19] Ghasemi, A., Mousavi, O., and Banisi, S. (2014). "Effect of Time Step on the Accuracy of DEM Calculation". In XXVII IMPC, Santiago, Chile, 1-9.
- [20] 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: 163-193.
- [21] Morrell, S. (1993). "The prediction of power draw in wet tumbling mills". Doctorate Thesis, University of Queensland, Australia.
- [22] NATIONAL IRANIAN COPPER INDUSTRIES COMPANY, (1977). "Primary Grinding, Operating Manual". section 4, 35-40.
- [3] Rezaeizadeh, M., Fooladi, M., Powell, M. S., and Weerasekara, N. S. (2010). "An Experimental Investigation of the Effects of Operating Parameters on the Wear of Lifters in Tumbling Mills". *Minerals Engineering*, 23: 558-562.
- [4] Hart, S. (2006). "Development of a SAG Mill Shell Liner Design at Cadia Using DEM Modelling". In *International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology*, Vancouver, III: 389-406.
- [5] Maleki-Moghadam, M., Yahyaei, M., and Banisi, S. (2013). "A Method to Predict Shape and Trajectory of Charge in Industrial Mill". *Minerals Engineering*, 46-47: 157-166.
- [6] McBride, A., and Powell, M. S. (2006). "A Structured Approach to Modelling SAG Mill Liner Wear—Numerical Modelling of Liner Evolution". In *International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology*, 3: 120-132.
- [7] Banisi, S., and Hadizadeh, M. (2007). "3-D liner wear profile measurement and analysis in industrial SAG mills". *Minerals Engineering*, 20: 132-139.
- [8] Hosseini P., Martins S., Martin T., Radziszewski P., and Boyer F. R. (2011). "Acoustic emissions simulation of tumbling mills using charge dynamics". *Minerals Engineering*, 24: 1440-1447.
- [9] Morrell, S. (2003). "Grinding mills: How to accurately predict their power draw". XXII International Mineral Processing Congress, 50-59.
- [10] Yahyaei, M., and Banisi, S. (2010). "Spreadsheet-Based Modeling of Liner Wear Impact on Charge Motion in Tumbling Mills". *Minerals Engineering*, 23: 1213-1219.
- [11] 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, 1-8.
- [12] 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: 22-35.
- [13] 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.
- [14] Xu, L., Luo, K., and Zhao, Y. (2018). "Numerical prediction of wear in SAG mills based on DEM simulations". *Powder Technology*, 329: 353-363. <https://>

¹ Rajamani et al.² Discrete element method (DEM)³ 3D-DEM⁴ Xu et al.⁵ Djordjevic et al.⁶ Yahyaei and Banisi⁷ Grinding media trajectory⁸ Microsoft Excel©⁹ Powell¹⁰ Morrell¹¹ Soft modeling



DOI: 10.30479/jmre.2019.9398.1177

Efficiency Improvement Of Ball Mill Liners By Simulation Of Balls And Ore Trajectory In Sarcheshmeh_copper Complex

Zare S.¹, Maleki Moghaddam M.^{2*}, Arghavani E.³, Ghasemi A.⁴, Banisi S.⁵

1- M.Sc Student, Kashigar Mineral Processing Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
Zare@kmpe.ir

2- Assistant Professor, Mineral Processing Group, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
m.maleki@vru.ac.ir

3- M.Sc Student, Kashigar Mineral Processing Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
Arghavani@kmpe.ir

4- PhD Student, Kashigar Mineral Processing Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
ghasemi@kmpe.ir

5- Professor, Mining Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
Banisi@uk.ac.ir

(Received: 01 Oct. 2018, Accepted: 16 Feb. 2019)

Abstract: Tumbling mill liners transfer the energy to the mill charge and have a significant effect on the load behavior. A plant audit at the Sarcheshmeh copper complex indicated that due to the inappropriate design of ball mills liners, the liners wear and tear increased and the grinding efficiency decreased. With the objective of investigating the design of initial, current and proposed liners, charge trajectory was simulated by the GMT and KMPCDEM software packages. It was observed that the charge impact point for the current liners design was above the toe and on the shell liners. By simulation it was found that increasing the liner lifter face angle from 0 to 15° and the lifter height from 18 to 21cm could decrease the difference between the impact point and the toe and direct ball impacts to liners. Given the promising results, the new liners were designed, constructed and installed in ball mill 4. The result of sampling for a period of one liner life indicated that the amount of particles smaller than 75 microns in ball mill 4 product (with proposed design) compared with ball mill 3 (with current design) increased by 2.5% and the liners life of the first half and second half increased by 18% and 20%, respectively.

Keywords: Ball mill, Liner, Lifter angle, Sarcheshmeh.

INTRODUCTION

The mining industry is a significant consumer of energy and 6% to 7% of the total world's energy is devoted to the industry. Comminution is the major consumer with a share of 40-50%. The grinding process accounts for 90% of the energy required, crushing uses 5-7% and explosives 3-5% [1]. The final stages of

primary comminution are performed in tumbling mills using steel balls as the grinding medium, and so are designated “ball mills”. The internal working faces of mills consist of renewable liners, which must withstand impact, be wear-resistant, and promote the most favorable motion to the charge. The structural characteristics of liners, lifter shape and mill speed substantially influence particle motion in tumbling mills and dramatically influence the grinding process and power draw of the mills [2, 3].

It has been well established that a change in the lifter face angle on tumbling mill shell lifters results in a change in the motion of the charge. With the development of trajectory-generating computer programs, the effects of operational conditions, face angle, packing and lifter height have been incorporated in the shell lifter design. Increasing shell liner face angle does reduce the impact point of thrown balls and can reduce shell liner damage [4-7].

In recent years, DEM (Discrete Element Method) has been used successfully for modelling and analyzing the internal dynamics of grinding mills motion. With this computational technique, the motion and interactions of individual bodies are calculated using a set of equations referred to as Newton’s laws and contact models. DEM helps to understand charge motion in tumbling mills for given liner designs and lifters, ball size and rock properties and mill operating conditions. Based on the success of the 2-D model of the tumbling mill the 3-D model in DEM was developed. These types of models could help study charge motion, power draw, liners wear and energy draft more accurately [6-13].

The charge trajectory is the main concern in liner design because the direct impact of balls to the shell liners could result in liner damage and breakage. The charge trajectory can be optimized by the modification of the liner design [5]. Yahyaei and Banisi (2010) designed a spreadsheet-based software (GMT; Grinding Media Trajectory) to model charge trajectory in tumbling mills [14]. Charge shape and charge motion predicted by the GMT program was based only on a single ball trajectory. Maleki-Moghaddam et al., (2013) proposed new relationships to modify the GMT results to take into consideration the effect of charge. By applying the corrections to the charge shape and motion, the GMT software outputs became more realistic [5].

The sarcheshmeh copper complex primary ball mills

This study was carried out at the Sarcheshmeh copper complex located southeast of Iran. Primary grinding circuit consists of eight single stage primary ball mills. The grinding plant has two sections, each consisting of four single-stage grinding ball mill operating in closed-circuit with ten cyclones. The mill discharge goes into a sump and is pumped to the cyclone cluster for size classification. Cyclone underflow recycles by gravity to the mill. Cyclone overflows from four grinding units (one of the two mill sections), at 28% solids, are combined and delivered to the corresponding rougher distributor [15].

The internal working faces of these mills consist of renewable liners. According to the preliminary design, they were made of manganese or chrome molybdenum steels [15]. The high noise levels of steel liners, their long replacement time, low lifetime and high costs have led to change the steel liners to rubber. Investigations showed that due to the inappropriate design of the existing liners, a direct collision of the balls load with the liners occurred. This research was then conducted to improve the grinding efficiency and extend the life of the liners.

METHODS

In this research, the process of designing a new liner starts with analytical and numerical simulation of the charge trajectory and modification of the liner geometry to arrive at the desired trajectory. The results of using the GMT software and 3D simulation of the Sarcheshmeh SAG mill by the KMPC_{DEM} software package to predict the charge motion are presented in detail. The comparison of the initial steel liner, current and proposed liner shape on the charge trajectory was the key step in arriving at the final liner shape. After final refinements of the liner design, engineering drawings were prepared and sent to the liner manufacturer.

The GMT software

In order to simulate the charge shape and motion, a new version of GMT [14] was used. In the new

version of GMT, Maleki-Moghaddam et al. (2013) corrected the charge shape. The main feature of GMT is the ability to show the crescent-like shape of the charge along with the charge trajectory, which has not been incorporated in the previous version and similar software packages [5]. A typical result page of the GMT software is shown in Figure 1.

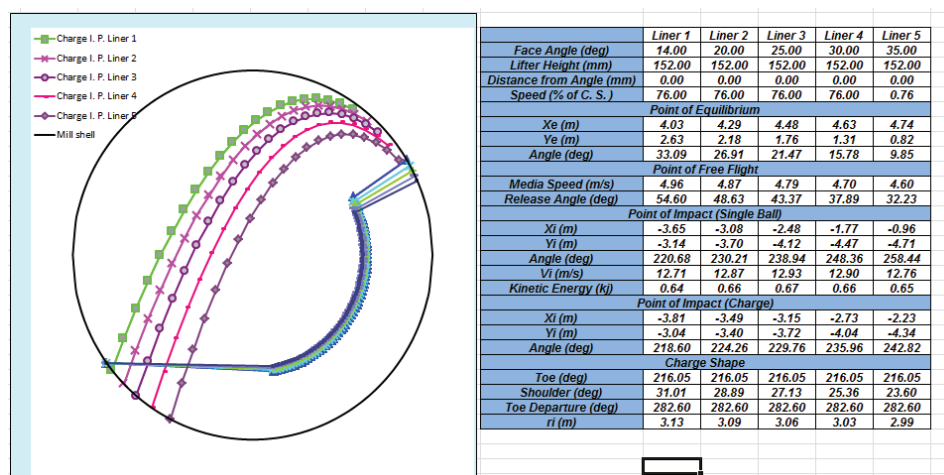


Figure 1. A typical result page of the GMT software

Charge motion simulation by discrete element method (DEM)

Discrete element method (DEM) modelling is a powerful tool to allow comparative analysis of various liner designs within the mill and has been widely used for liner design in the recent years. In this research, three-dimensional DEM simulations were performed by the KMPC_{DEM} software at the same operating conditions for old and proposed liners in order to predict the charge shape and impact point. The development of the software started in 2013 at the Kashigar Mineral Processing Research Center (KMPC). Full access to the software source codes enabled us to add or modify the algorithms and related relationships. Further details can be found elsewhere [13].

FINDINGS AND ARGUMENT

With the objective of investigating the effect of the initial, current and proposed liners on the charge trajectory simulations were performed by the GMT and KMPC_{DEM} software packages. Since the lifter face angle has the main impact on the load trajectory and, it was decided to increase the lifter face angle of liners. Increasing the shell lifter face angle (for the same mill speed) reduces the impact point of thrown balls, increases the distance between ball impact points and liners which results in reduction of the shell liner damage. As the angle of the lifter increases, the wear of the liners increases and its lifetime decreases. To overcome this problem and to increase the liner life, the height of the liners was increased in the proposed design. A typical snapshot of load trajectory simulation using the KMPC_{DEM} software for steel liners, current and proposed design is shown in Figure 2.

By simulation it was found that increasing the liner lifter face angle from 0 to 15° and the lifter height from 18 to 21cm could decrease the difference between the impact point and the toe and direct balls impact to liners. Finally, considering the operating conditions and constraints on the installation of liners, the industrial liners were designed and sent to the manufacturer for construction. After installing the new liners, the performance of the liners was monitored. The result of sampling for a period of one liner life indicated that the amount of particles smaller than 75 microns in the product of ball mill 4 (proposed design) in comparison with ball mill 3 (current design) increased by 2.5% and the liners life of the first half and second half increased by 18% and 20%, respectively.

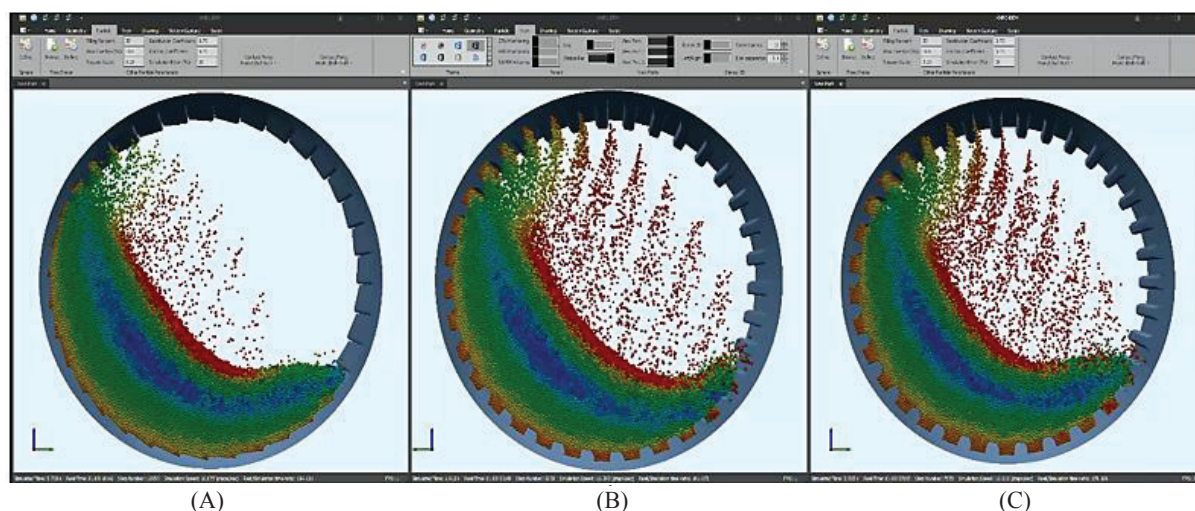


Figure 2. A typical snapshot of load trajectory simulation using the KMPC_{DEM} software for A: steel liners, B: current and C: proposed design

CONCLUSIONS

Investigations showed that at the Sarcheshmeh grinding circuit due to the inappropriate design of ball mills liners, the liners wear and tear increased and the grinding efficiency decreased.

With the objective of investigating the effect of initial steel liners, current and proposed liners, the charge trajectory was determined through simulation by the GMT and KMPC_{DEM} software packages.

The simulation of the charge trajectory indicated that the charge impact point for the current liners design was above the toe and on the shell liners. The results indicated that increasing the liner lifter face angle from 0 to 15° and the lifter height from 18 to 21cm could decrease the difference between the impact point and the toe and direct balls impact to liners.

Given the promising results, the new liners were designed, constructed and installed in ball mill 4. The result of sampling for a period of one liner life indicated that the amount of particles smaller than 75 microns in the product of ball mill 4 (proposed design) in comparison with ball mill 3 (current design) increased by 2.5% and the liners life of the first half and second half increased by 18% and 20%, respectively.

REFERENCES

- [1] Manouchehri, H. R. (2014). "Changing the game in comminution practices: Vibrocone TM, a new Crusher having grinding performance". In XXVII IMPC, Santiago, Chile, 1-13.
- [2] Wills, B. A., and Finch, J. A. (2016). "Wills's Mineral Processing Technology". 8nd ed., Elsevier, pp. 498.
- [3] Rezaeizadeh, M., Fooladi, M., Powell, M. S., and Weerasekara, N. S. (2010). "An Experimental Investigation of the Effects of Operating Parameters on the Wear of Lifters in Tumbling Mills". Minerals Engineering, 23: 558-562.
- [4] Hart, S. (2006). "Development of a SAG Mill Shell Liner Design at Cadia Using DEM Modelling". In International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, Vancouver, III: 389-406.
- [5] Maleki-Moghadam, M., Yahyaei, M., and Banisi, S. (2013). "A Method to Predict Shape and Trajectory of Charge in Industrial Mill". Minerals Engineering, 46-47: 157-166.
- [6] McBride, A., and Powell, M. S. (2006). "A Structured Approach to Modelling SAG Mill Liner Wear-Numerical Modelling of Liner Evolution". In International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, 3: 120-132.
- [7] Morrell, S. (2003). "Grinding mills: How to accurately predict their power draw". XXII International Mineral Processing Congress, 50-59.

- [8] 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, 1-8.
- [9] Bian, X., Wang, G., Wang, H., Wang, S., and Lv, W. (2017). "Effect of lifters and mill speed on particle behavior, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation". Minerals Engineering, 105: 22-35.
- [10] 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.
- [11] Xu, L., Luo, K., and Zhao, Y. (2018). "Numerical prediction of wear in SAG mills based on DEM simulations". Powder Technology, 329: 353-363. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.004>.
- [12] Scharpf, D. (2008). "DEM Applications: Simulation of Particulate Solids Handling and Processing Operations Using the Discrete Element Method". Vision of Engineering Analysis and Simulation: NAFEMS Company, Developer of EDEM Software, 9-30.
- [13] Ghasemi, A., Mousavi, O., and Banisi, S. (2014). "Effect of Time Step on the Accuracy of DEM Calculation". In XXVII IMPC, Santiago, Chile, 1-9.
- [14] Yahyaei, M., and Banisi, S. (2010). "Spreadsheet-Based Modeling of Liner Wear Impact on Charge Motion in Tumbling Mills". Minerals Engineering, 23: 1213-1219.
- [15] NATIONAL IRANIAN COPPER INDUSTRIES COMPANY, (1977). "Primary Grinding, Operating Manual". section 4, 35-40.