

«یادداشت فنی»

افزایش کارایی آسیاهای نیمه خود شکن سنگ آهن گل گهر و مس سرچشمه از طریق اصلاح

طرح آستر با روش اجزای گسسته

علیرضا قاسمی^۱، مصطفی مالکی مقدم^۲، عرفان رازی^۳، صمد بنیسی^{۴*}^۱ دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی دانشگاه شهید باهنر کرمان و محقق مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی گر، ghasemi@kmpc.ir^۲ استادیار فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، m.maleki@var.ac.ir^۳ دانشجوی کارشناسی مهندسی کامپیوتر دانشگاه شهید باهنر کرمان و محقق مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی گر، razi@kmpc.ir^۴ استاد فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، banisi@uk.ac.ir

(دریافت ۱۰ آذر ۱۳۹۶، پذیرش ۱۰ دی ۱۳۹۷)

چکیده

در شرکت سنگ آهن گل گهر و مجتمع مس سرچشمه از آسیاهای نیمه خودشکنی به ترتیب با قطر ۹ و ۱۰ متر و طول ۲ و ۴/۹ متر برای خرید سنگ معدن استفاده می شود. پایش عملیات در این دو کارخانه نشان داد که تناژ آسیای گل گهر کمتر از حد انتظار و دارای نوسان زیاد و آسیای سرچشمه همواره متحمل شکستگی آستر و توقفات خارج از برنامه بود. جهت رفع این مشکلات و افزایش کارایی عملیات، مسیر حرکت بار که عامل مهمی در فرایند خرید است، مورد بررسی قرار گرفت. جهت شبیه سازی مسیر حرکت ذرات در آسیا، از نرم افزار $KMPC_{DEM}$ که بر مبنای روش اجزای گسسته کد نویسی شده است، استفاده گردید. نتایج شبیه سازی مسیر بار با دو طرح آستر مختلف، با اندازه گیری مسیر واقعی در آسیایی با روبه قابل مشاهده با قطر یک متر و طول ۲۲ سانتی متر اعتبارسنجی شدند. بررسی نتایج شبیه سازی نشان داد که موادی که در آبخاری بزرگ قرار دارند مستقیماً به آستر برخورد می کنند. برای حل این مشکل، با طرح های مختلف با شرایط آسیای کارخانه ها مسیر بار برای رسیدن به حالتی که محل برخورد بار روی پاشنه باشد، شبیه سازی شد. برای دستیابی به این هدف مشخص شد که برای آسیای گل گهر زاویه ی بالابرها باید از ۷ به ۳۰ درجه افزایش یابد و برای آسیای سرچشمه علاوه بر کاهش تعداد بالابرها از ۶۰ به ۴۰، زاویه آن ها از ۱۵ به ۳۰ درجه باید تغییر کند. این طرح آسترها برای دو کارخانه ساخته و نصب شدند و کارایی این آسیاها مورد پایش دقیق قرار گرفتند. در آسیای گل گهر، تناژ ورودی به آسیا ۱۷ درصد افزایش یافت و نوسان آن نشان از پایداری فرآیند داشت ۳۱٪ کاهش نشان داد. در آسیای سرچشمه تعداد متوسط آستر شکسته شده از ۴/۲ قطعه به یک قطعه و نوسان تناژ آسیا ۳۰٪ کاهش یافت.

کلمات کلیدی

مسیر حرکت بار، آسیای نیمه خودشکن، مجتمع مس سرچشمه، مجتمع سنگ آهن گل گهر، نرم افزار $KMPC_{DEM}$

۱- مقدمه

اولیه، ظرفیت این آسیا باید ۱۰۰۰ تن بر ساعت باشد ولی در عمل به دلیل شکستگی‌های آستر که در این آسیا رخ می‌داد و منجر به کاهش زمان دسترسی به آسیا می‌شد، به طور میانگین این مقدار غیر قابل دسترسی و حدوداً برابر ۸۶۰ تن بر ساعت بود. از این رو، پیدا کردن راه‌حلی برای کاهش میزان شکست آسترها، می‌توانست به افزایش تولید و رسیدن به ظرفیت اسمی کمک شایانی بکند.

به طور کلی، آسیاها به عنوان مهم‌ترین تجهیزات کارخانه‌های فرآوری مواد، بخش زیادی از انرژی مصرفی کارخانه را به خود اختصاص می‌دهند و افزایش کارایی این تجهیزات تاثیر چشمگیری بر بهبود بهره‌وری کارخانه دارد [۱، ۲]. آنچه در آسیاهای نیمه‌خودشکن کارخانه مگنتیت گل‌گهر سیرجان و کارخانه فاز یک مجتمع مس سرچشمه رخ می‌دهد نمونه‌هایی اند که اهمیت مطالعه و بررسی فرآیند آسیاکنی و ارایه راهکارهای عملی برای بهبود عملکرد آن‌ها را نمایان می‌سازد. هدف از انجام این تحقیق، ارایه راه‌حلی عملی برای بهبود فرآیند خریداری در آسیاهای نیمه‌خودشکن از طریق اصلاح طرح آستر است. راهکارهای پیشنهادی برای دو کارخانه گل‌گهر و مس سرچشمه به صورت عملی پیاده‌سازی شد و با پایش عملکرد آسیاها برای یک دوره بلند مدت و مقایسه آن با دوره‌های قبلی، تاثیر مثبت آن نشان داده شد.

۲- تئوری مقاله

۲-۱- فرآیند خریداری در آسیاهای نیمه‌خودشکن

مسیر حرکت مواد در آسیاها یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که در بهینه‌سازی فرآیند خریداری در آسیاها همواره مورد توجه بوده است. به عبارت دیگر، عملکرد آسیاها وابسته به نحوه حرکت مواد در آن است؛ اگر مواد به بدنه آسیا بچسبند هیچ خریداری انجام نمی‌شود و اگر مواد روی هم بلغزند تنها خریداری از نوع سایشی بوده و عمدتاً پودر تولید می‌شود. این پارامتر در عملکرد آسیاهای خودشکن که کل انرژی خریداری و آسیاهای نیمه‌خودشکن که بخشی از انرژی خریداری به وسیله خود مواد تامین می‌شود، بسیار حایز اهمیت است. در نتیجه، اگر مواد در آسیاها مسیری را طی کنند که در آن سهم برخورد مستقیم ذره با ذره، نسبت به ذره با آستر افزایش یابد، عمده انرژی آسیا صرف خریداری می‌شود. در صورتی که مسیر حرکت ذرات نامناسب باشد برخورد مستقیم ذرات و گلوله به آسترها افزایش پیدا می‌کند و احتمال شکست آسترها بالا می‌رود و تعداد توقف‌های خارج از برنامه کارخانه افزایش پیدا می‌کند.

در سال‌های اخیر، به دلیل کاهش عیار سنگ معدن‌ها، استفاده از تجهیزات بزرگ با ظرفیت‌های بالا در عمده بخش‌های کارخانه‌های فرآوری به امری معمول تبدیل شده است. به کارگیری تجهیزات بزرگ، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری به ازای تناژ تولید شده را کاهش داده و به همین دلیل این امر مورد توجه طراحان و مدیران کارخانه‌ها قرار گرفته است. این روند تغییر از اولین بخش‌های کارخانه‌ها (سنگ‌شکن‌های اولیه) تا بخش‌های انتهایی خطوط تولید (تیکنرهای باطله)، قابل مشاهده‌اند.

یکی از مهم‌ترین این تجهیزات، آسیاهای نیمه‌خودشکن‌اند که به دلیل هزینه‌های تعمیر و نگهداری پایین‌تر نسبت به سایر تجهیزات خریداری و همچنین راهبری ساده‌تر، جایگزین چندین مرحله سنگ‌شکنی و آسیاکنی شده‌اند. کارخانه فرآوری مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان و کارخانه پریارسازی مجتمع مس سرچشمه دو نمونه از این کارخانه‌ها است که استفاده از این رویکرد در طراحی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

کارخانه مگنتیت مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر سیرجان، شامل سه خط خریداری است که در هر خط، یک آسیای نیمه‌خودشکن به قطر ۹ و طول ۲ متر نصب شده است که وظیفه خریداری مواد از اندازه کوچکتر از ۲۰ سانتی‌متر به اندازه ۸۰ درصد عبوری از ۴۰۰ میکرون را بر عهده دارد. این آسیاها از نوع سرعت ثابت است که سرعت عملیاتی آن‌ها ۸۵ درصد سرعت بحرانی و پرشدگی آن‌ها به طور متوسط برابر ۲۵ درصد است. در این آسیاها که به صورت خشک کار می‌کنند، ۳۶ ردیف آستر با زاویه ۷ درجه به کار گرفته شده‌اند. در طرح اولیه این کارخانه، ظرفیت هر یک از این آسیاها ۶۰۰ تن بر ساعت در نظر گرفته شده است ولی پایش‌های انجام شده نشان داد که ظرفیت آن‌ها با همان اندازه ذرات محصول به طور متوسط ۴۵۰ تن بر ساعت است. این آمار نشان داد که کارایی آسیاکنی کمتر از مقدار پیش‌بینی شده است و در نتیجه باید امکان اصلاح و افزایش ظرفیت عملیاتی کنونی به ظرفیت طراحی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

در مورد مشابه دیگری، در کارخانه فاز یک مجتمع مس سرچشمه، یک آسیای نیمه‌خودشکن تر به طول ۶ متر و قطر ۱۰ متر برای خریداری مواد از اندازه کوچکتر از ۲۵ سانتی‌متر به اندازه ۸۰ درصد عبوری از ۳۰۰ میکرون به کار گرفته شده است. سرعت این آسیا نیز ثابت و ۷۶ درصد سرعت بحرانی و پرشدگی متوسط آن ۲۵ درصد است. در این آسیا تعداد ۶۰ آستر با زاویه صفحه بالابر ۱۵ درجه به کار گرفته شده است. بر اساس طراحی

باید هندسه آسترها به صورت ساده شده وارد نرم افزار شود که ممکن است باعث انحراف نتایج از واقعیت شود.

۲-۲-۲- آسیای کوچک مقیاس

روش دیگری که برای تعیین نیمرخ بار مورد استفاده قرار می گیرد، تعیین مسیر حرکت بار با استفاده از آسیای کوچک مقیاس (مدل) است [۲، ۳، ۵، ۶]. این روش دقیق ترین روش شناخته شده برای تعیین مسیر حرکت بار در آسیاهای صنعتی است. در این روش، یک آسیا با اندازه کوچک به گونه ای ساخته می شود که حداقل یک دیواره آن شفاف باشد تا امکان مشاهده مسیر حرکت بار و تصویربرداری از آن فراهم شود، سپس از مسیر حرکت بار تصویربرداری می شود و مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد.

در این روش، اولین مرحله تعیین نسبت قطر آسیای صنعتی به آسیای کوچک مقیاس است. به عنوان مثال، اگر قطر آسیای صنعتی ۱۰ متر و قطر آسیای مدل یک متر باشد، این نسبت برابر ۱۰ می شود. پس از تعیین این نسبت، آسترهای آسیای مدل باید کاملاً مشابه هندسه آسترهای آسیای صنعتی اما ۱۰ برابر کوچک تر ساخته شود تا نسبت قطر آسیا به ارتفاع آسترها در آسیای مدل حفظ شود.

اندازه ذرات و مواد مورد استفاده در آزمایش نیز باید به نوعی در نظر گرفته شود که این نسبت حفظ شود. به عبارت دیگر، اگر اندازه بزرگ ترین ذره در آسیا برابر ۱۲ سانتی متر باشد، اندازه بزرگ ترین ذره ای که در آزمایش باید به کار گرفته شود، برابر با ۱/۲ سانتی متر در نظر گرفته می شود. برای بقیه ابعاد ذرات نیز باید به همین طریق عمل کرد. کسر پرشدگی و درصد سرعت آسیای مدل نیز همواره برابر با آسیای صنعتی در نظر گرفته می شود.

در آسیای مدل، چون آسترها به هر شکلی قابل ماشین کاری اند و مسیری که به این طریق به دست می آید مسیر توده ذرات است، می توان گفت که نقص های نرم افزار GMT که محدودیت در وارد کردن هندسه آسترهای پیچیده و نمایش مسیر حرکت بحرانی ترین ذره بود، رفع شده است.

در کنار این مزایا، این روش معایبی هم دارد. مهم ترین ایراد این روش، هزینه بر و زمان بر بودن است. عمده این هزینه ها شامل طراحی مدل کوچک مقیاس شده آسترها، ساخت و ماشین کاری آنها، نصب آسترها در آسیای مدل و سایر آماده سازی ها است که معمولاً انجام هر آزمایش گاهی به یک ماه زمان نیاز دارد. علاوه بر این هزینه ها، گاهی دسترسی به آسیای مدل برای

شکست آسترها در آسیاهای اولیه به ویژه در آسیاهای نیمه خودشکن به دلیل قطر زیاد آنها (۱۲ متر) و استفاده از گلوله های بزرگ (۱۵ سانتی متری) گزارش شده است [۱، ۲].

اولین قدم در دستیابی به طرح آستر مناسب در آسیاها، تعیین دقیق مسیر حرکت مواد است اما به دلیل شرایط عملیاتی و هندسه آسیاها، مشاهده و تعیین دقیق مسیر حرکت مواد در آسیاهای صنعتی، مستقیماً امکان پذیر نیست. به همین دلیل، از روش های دیگری که در ادامه می آید برای تخمین یا تعیین مسیر حرکت بار استفاده می شود.

۲-۲- تعیین نیمرخ بار در آسیاها

برای به کارگیری روش های غیرمستقیم، ابتدا باید کلیه عوامل تاثیرگذار را شناسایی کرد و مورد بررسی قرار داد. از میان عواملی که در مسیر حرکت بار تاثیرگذارند، سرعت چرخش آسیا و طرح آسترهای آن بیشترین نقش را ایفا می کند. معمولاً آسیاهای رایج در صنایع، به دلیل هزینه پایین تر از نوع سرعت ثابت است، در نتیجه مسیر حرکت مواد عمدتاً تابع طرح آسترها است. اندازه، شکل و رطوبت ذرات نیز در مسیر حرکت مواد تاثیرگذارند اما میزان تاثیر آنها در مقایسه با دو عامل قبل، قابل چشم پوشی است. [۲، ۳].

برای تعیین مسیر حرکت بار می توان از روش های عددی و تحلیلی مانند استفاده از نرم افزار GMT^۵ و یا مدلسازی های فیزیکی مانند آسیای آزمایشگاهی استفاده کرد. در ادامه این دو روش به طور مختصر شرح داده شده است.

۲-۲-۱- نرم افزار GMT

استفاده از نرم افزار GMT یکی از آسان ترین و ارزان ترین راه های شناخت مسیر حرکت بار است که با به کارگیری روش های تحلیلی ریاضی، مسیر حرکت تک گلوله را تخمین می زند [۴]. برای کار با این نرم افزار، کاربر باید مشخصات هندسه آسیا، زاویه بالابر آسترها و اندازه بزرگ ترین ذره موجود در عملیات آسیاکنی را وارد کند. در نهایت نرم افزار GMT مسیر حرکت بحرانی ترین ذره و موقعیت تجمع مواد در آسیا را محاسبه می کند و در محیط کاربری به نمایش می گذارد.

در کنار مزایای نرم افزار GMT، محدودیت هایی نیز وجود دارد. یکی از محدودیت های آن تعیین مسیر حرکت بحرانی ترین گلوله و نادیده گرفتن مسیر توده گلوله ها و ذرات است. محدودیت دیگر این نرم افزار، عدم امکان وارد کردن دقیق شکل آستر است. به عبارت دیگر اگر هندسه آسترها پیچیدگی زیادی داشته باشد،

$$V = g\Delta t \quad (2)$$

که در این روابط:

X موقعیت هر یک از ذرات بر اساس سرعت

V سرعت

g شتاب گرانش

Δt زمان

اما در صورتی که ذرات با یکدیگر برخورد داشته باشند، علاوه بر شتاب گرانش، شتابی دیگر که ناشی از نیروی برخورد (F) است (رابطه ۳)، به آنان وارد شده و سرعت جدید این ذرات، با این شتاب محاسبه می شود (رابطه ۴). این نیرو خود شامل دو مولفه عمودی (F^n) و مماسی (F^t) است (رابطه ۵). در این حالت ابتدا، میزان همپوشانی (Δx) هر یک از ذرات محاسبه می شود. همپوشانی، میزان نفوذی است که دو ذره در اثر برخورد، پیدا می کنند. متناسب با میزان همپوشانی و با استفاده از مدل نیروی برخورد، نیروی اعمالی به هر یک از ذرات محاسبه می شود. فرضیاتی برای ساده سازی محاسبات در راگ در نظر گرفته می شود. از جمله این فرضیات شبیه سازی نیروی برخورد بین دو ذره با استفاده از مدل فنر- میراگر است (شکل ۱).

در مدل فنر- میراگر، مولفه های عمودی (F^n) و مماسی (F^t) نیروهای برخورد، با استفاده از رابطه های ۶ و ۷ محاسبه می شود.

$$a = \frac{F}{m} + g \quad (3)$$

$$V = a\Delta t \quad (4)$$

$$F = F^n + F^t \quad (5)$$

$$F^n = K^n \int \Delta x^n + C^n V_{rel}^n \quad (6)$$

$$F^t = K^t \int \Delta x^t + C^t V_{rel}^t \quad (7)$$

در این روابط:

C توابع میرایی

K سختی

V_{rel} سرعت نسبی برخورد ذرات

n بالانویس n مولفه عمودی پارامتر

t بالانویس t مولفه مماسی پارامتر

محققان مقدور نبوده است و عملاً استفاده از این روش غیرعملی است.

در کنار این دو روش، روش اجزای گسسته^۶، راگ، قرار دارد که در سال های اخیر توجه زیادی به خود جلب کرده است. این روش یک روش عددی است که علاوه بر دارا بودن مزایای آسیای مدل، معایب آن را ندارد. این روش به اختصار در ادامه شرح داده شده است.

۲-۳- شبیه سازی با روش اجزای گسسته

شبیه سازی با روش اجزای گسسته ابتدا در سال ۱۹۷۹ توسط کاندال^۱ [۷] برای شبیه سازی رفتار دانه های خاک تحت بارگذاری دینامیکی ارایه شد. در زمینه فرآوری مواد معدنی در سال ۱۹۹۲، میشر^۲ و راجامانی^۳ [۸]، با شبیه سازی دوبعدی حرکت بار در آسیای گلوله ای آزمایشگاهی و اعتبارسنجی نتایج آن با واقعیت، راگ را وارد این عرصه کردند. پس از آن ها، کلری^۴ [۹] در سال ۱۹۹۸ با ارایه پژوهشی، توان کشی، جدانشینی و حرکت بار را در سرعت ها و پرشدگی های مختلف در آسیای گلوله ای به صورت دوبعدی مورد بررسی قرارداد که نشان از دقت و صحت خوب این روش بود. بعدها روند شبیه سازی آسیا توسط محققان زیادی دنبال شد [۱۰-۱۵].

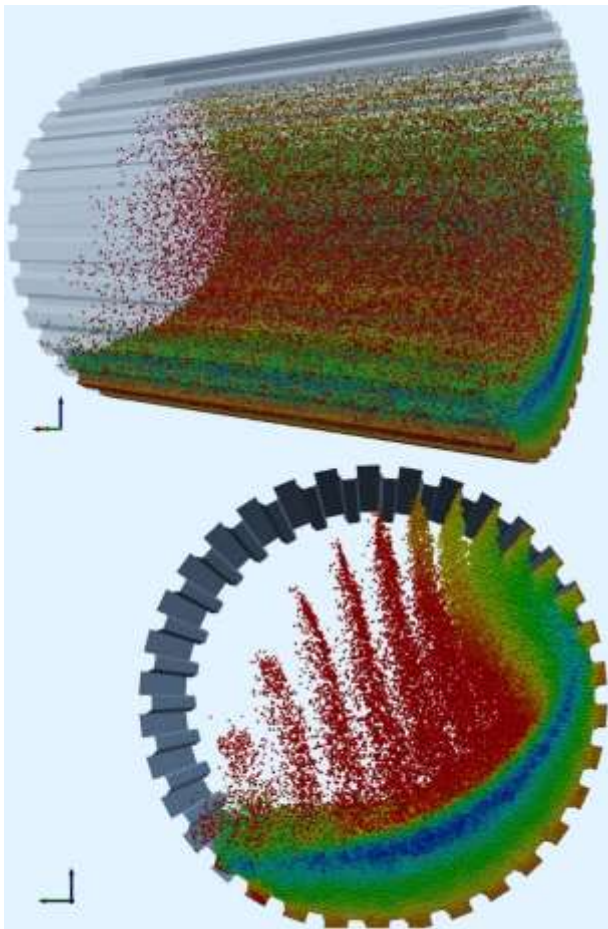
۲-۴- اساس شبیه سازی با روش اجزای گسسته

شبیه سازی با راگ شامل دنبال کردن موقعیت هر یک از ذرات در جریان ذره ای و مدل کردن برخوردهای آن ها با یکدیگر و محیط پیرامون است [۷، ۱۶]. در راگ، هر یک از ذرات با یک سری ویژگی های ثابت شامل شکل، اندازه، چگالی، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، ضریب اصطکاک، ضریب اصطکاک چرخشی، ضریب چسبندگی، ضریب استرداد شناخته می شود. در هنگام شبیه سازی با توجه به خصوصیات ثابت و قوانین فیزیکی، در هر لحظه خصوصیات متغیر ذرات شامل سرعت، شتاب و موقعیت محاسبه می شود [۱۷]. از آنجا که عکس العمل ذرات (تغییر موقعیت و سرعت) وابستگی زیادی به هندسه تجهیزات دارد، بنابراین از نحوه عکس العمل ذرات در روش اجزای گسسته می توان به درک بهتری از فرآیند در تجهیز مورد نظر دست پیدا کرد.

در راگ زمانی که ذرات به صورت آزادانه در محیط حرکت می کنند، سرعت و شتاب گرانش در هر لحظه محاسبه می شود (رابطه های ۱ و ۲).

$$X = V\Delta t \quad (1)$$

از جمله قابلیت‌های این نرم‌افزار است که بررسی فرآیند حرکت ذرات در آسیا را آسان‌تر کرده است.

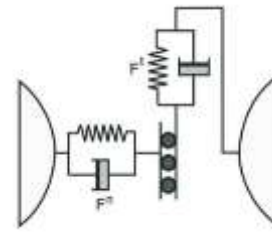


شکل ۲- مثالی از نتایج نرم‌افزار KMPCDEM

برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار KMPCDEM لازم بود تا مسیر باری که به وسیله این نرم‌افزار به دست می‌آید با یک مدل‌سازی فیزیکی مقایسه شود. برای انجام مدل‌سازی فیزیکی و مقایسه آن با نتایج نرم‌افزار از آسیای مدل مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر استفاده شد. ویژگی‌ها و قسمت‌های مختلف این آسیا در ادامه آمده است.

۲-۲- آسیای مدل مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر

قطر این آسیا یک متر و طول آن متغیر و می‌تواند حداکثر برابر ۲۱ سانتی‌متر باشد. در این آسیا از گلوله‌های فلزی، پلاستیکی و یا از ماده معدنی، به عنوان ذرات، می‌توان استفاده کرد. آسترهای این آسیا قابل تعویض است و هر نوع آستر را با هر طرحی می‌توان در آن نصب کرد. یک دیواره این آسیا، شفاف است و امکان مشاهده مستقیم و تصویربرداری از فرآیند وجود دارد. علاوه بر این، در این آسیا برای کنترل و ثبت اطلاعات، از



شکل ۱- مدل نیروی برخورد فنر- میراگر [۱۸]

با داشتن مقدار جرم گلوله‌ها و محاسبه مولفه‌های نیرو با استفاده از روابط ۶ و ۷، مقادیر شتاب در جهت عمودی و مماسی و به دنبال آن سرعت و موقعیت جدید ذرات محاسبه می‌شود.

بر این مبنا تاکنون نرم‌افزارهای متعددی تولید شده‌اند که یکی از آنها نرم‌افزار KMPCDEM است که در مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر برنامه‌نویسی شده است که در ادامه به معرفی آن پرداخته می‌شود.

۳- روش کار

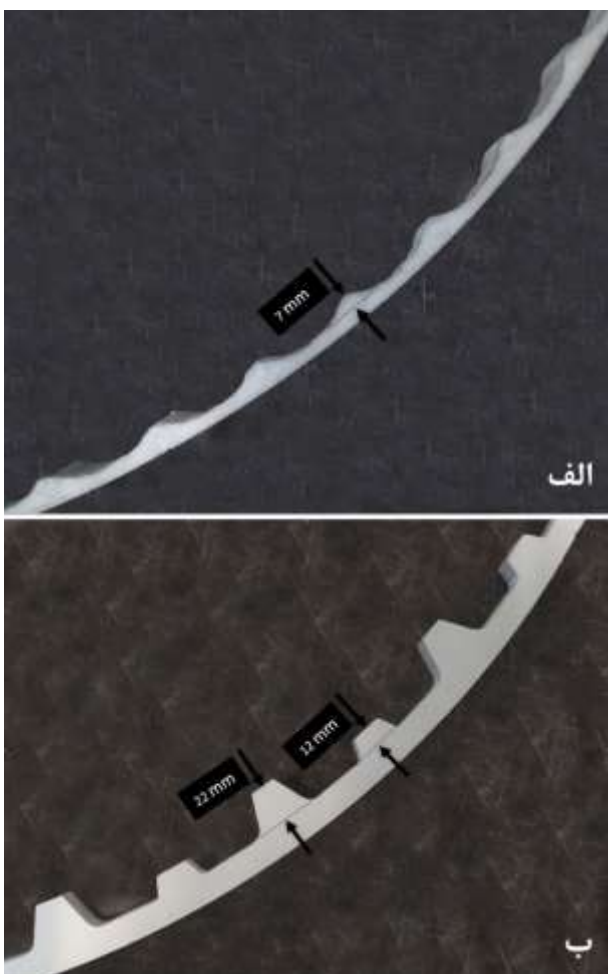
۳-۱- نرم‌افزار KMPCDEM

این نرم‌افزار در مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر کدنویسی 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 شوند. سپس پرونده‌های ایجاد شده با این نرم‌افزارها، در نرم‌افزار KMPCDEM فراخوانی شوند. در مرحله بعد نحوه حرکت این تجهیز و میزان و راستای سرعت آن تعریف شده و در پایان دانه‌بندی ذراتی که قرار است در شبیه‌سازی حضور داشته باشند و میزان پرشدگی تعیین می‌شود. در نهایت با اجرای نرم‌افزار، مسیر حرکت ذرات در تجهیز مورد نظر به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده و نتایج آن به صورت سه‌بعدی و در هنگام اجرای شبیه‌سازی از هر زاویه‌ای در محیط گرافیکی نرم‌افزار KMPCDEM قابل مشاهده است. به عنوان مثال، شکل ۲ شبیه‌سازی یک آسیای گلوله‌ای به قطر ۵ متر، طول شش متر، پرشدگی ۳۵ درصد و سرعت ۷۵ درصد سرعت بحرانی، در حضور بیش از ۶۰۰ هزار ذره را در نماهای مختلف نشان می‌دهد.

با این نرم‌افزار از هر مقطع مورد نیازی می‌توان تصویر تهیه کرد و یا وضعیت گلوله‌ها را از نظر سرعت و نیرو و یا خواص دیگر مورد بررسی قرار داد. در این نرم‌افزار می‌توان به شکل مجازی در هر موقعیتی از آسیا یک دوربین قرار داد و داده‌های مورد نیاز را جمع‌آوری کرد. نمایش دیواره آسیا به شکل شفاف و یا کدر و تعیین طیف رنگی ذرات بر اساس سرعت، اندازه نیرو و نظایر آن

زاویه این بالابرها نسبت به خط عمود ۲۵ درجه، ارتفاع بالابره‌های کوتاه ۱۲ و ارتفاع بالابره‌های بلند ۲۲ میلی‌متر بود.

با استفاده از این آسترها دو شبیه‌سازی در پرشدگی ۲۵ درصد در سرعت‌های ۶۵ و ۷۵ درصد سرعت بحرانی انجام شد. در این آزمایش‌ها طول آسیا برابر ۱۰۸ میلی‌متر بود، چون بررسی‌ها نشان داده‌اند که اگر ذرات در آسیا ۱۲ میلی‌متر باشد، طول آسیای آزمایشگاهی باید حداقل ۱۰۸ میلی‌متر باشد تا دیواره‌های ابتدایی و انتهایی آسیا، در شکل بار تاثیری نداشته باشند. اگر طول آسیا کمتر از این مقدار باشد، محل شانه بار به صورت غیر واقعی بالاتر خواهد رفت [۱۹].



شکل ۴- الف) آستر نوع اول و ب) آستر نوع دوم

آنچه در شکل ۴ نشان داده شده، تنها یک ردیف هر آستر و دارای طول ۳۶ میلی‌متر است. از آنجا که باید این حداقل طول رعایت می‌شد، از هر کدام از آسترها سه عدد ساخته شد تا با در کنار هم قرار گرفتن و اتصال آن در آسیا، طول مورد نظر فراهم شود. دلیل این کار، عدم وجود صفحات تفلون با ضخامت بیش از ۳۶ میلی‌متر و کیفیت پایین ماشین‌کاری صفحات با ضخامت بالاتر از این مقدار بود.

حسگرها، ابزار نمایشی و عناصر کنترلی استفاده شده است (شکل ۳).



شکل ۳- آسیای آزمایشگاهی مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر

۳-۳- اعتبارسنجی نرم‌افزار KMPC_{DEM}

برای اعتبارسنجی این نرم‌افزار، دو نوع آستر در ابعاد یک متری به منظور نصب در آسیای آزمایشگاهی طراحی و با استفاده از برش CNC ساخته و جداگانه در آسیا نصب شد. سپس تعدادی آزمایش با استفاده از این آسترها و دانه‌بندی آورده در جدول ۱، انجام شد. پس از اجرای هر آزمایش، از مسیر حرکت مواد ۱۰ تصویر ثبت شد تا بتوان شکل بار را با در نظر گرفتن نوسانات احتمالی مورد بررسی قرار داد. در ادامه شرایط انجام آزمایش‌ها با این دو آستر شرح داده شده است.

جدول ۱- دانه‌بندی ذرات در آسیای آزمایشگاهی

۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	قطر ذرات (میلی‌متر)
۸	۱۱	۱۴	۱۱	۲۶	۳۰	مقدار (درصد)

آستر اول:

این آستر شامل ۶۰ بالابر شبه‌موجی شکل بود که به طور یکنواخت در دیواره آسیا توزیع شده بود (شکل ۴- الف). ارتفاع بالابره‌های این آستر برابر ۷ میلی‌متر بود. با استفاده از این آستر دو شبیه‌سازی در سرعت ۷۵ درصد سرعت بحرانی و در پرشدگی‌های ۱۰ و ۲۵ درصد انجام شد.

آستر دوم:

این آستر شامل ۴۰ ردیف آستر از نوع کوتاه- بلند بود که به طور یکنواخت در محیط آسیا توزیع شده بود (شکل ۴- ب).

جدول ۲- دانه‌بندی ذرات در شبیه‌سازی آسیاهای صنعتی

۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰	قطر ذرات (میلی‌متر)
۸	۱۱	۱۴	۱۱	۲۶	۳۰	مقدار (درصد)

پس از اجرای این شبیه‌سازی‌ها، ابتدا به شبیه‌سازی‌ها مهلت داده شد تا مسیر حرکت بار و به تبع آن شکل نیمرخ بار به حالت پایدار برسد. این حالت پایدار بسته به سرعت و طرح آستر و دانه بندی متفاوت است. تعیین زمان دقیق پایدار شدن حرکت مواد در آسیا موضوع این مقاله نیست به همین دلیل در اینجا زیاد به آن پرداخته نشده است؛ به طور کلی فرآیند، زمانی در حال پایداری است که شکل مسیر حرکت بار در طول زمان تغییر نکند. خاصیت پایدار بودن در آسیای صنعتی زمانی اتفاق می‌افتد که روند تغییرات توان کشی به حالت تقریباً پایداری درآید.

پس از پایدار شدن، از مسیر حرکت مواد چندین تصویر تهیه شد، سپس این تصاویر مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد، به منظور اصلاح مسیر حرکت بار و بهبود فرآیند آسیاکنی، طرح‌هایی برای آسترهای هر کدام از آسیاها پیشنهاد شد. سپس این طرح‌ها مانند مرحله قبل و با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی آسیاهای مربوط شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفت. پس از بررسی طرح‌های مختلف آسترها، طرحی که در آن مسیر حرکت بار از دید فرآیندی به مسیر حرکت مطلوب نزدیک بود انتخاب شد. از هر طرح آستر یک سری کامل ساخته و در آسیاها نصب شد. در مرحله پایانی نیز، عملکرد هر کدام از آسیاها پایش و با دوره‌های مشابه قبلی مقایسه و میزان تاثیرگذاری این آسترها در فرآیند بررسی شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی دقت نتایج نرم‌افزار KMPC_{DEM}

نتایج چهار آزمایش انجام شده با آسیای مدل و شبیه‌سازی با نرم‌افزار KMPC_{DEM} در شکل ۵ آمده است. در شکل ۵ تصاویر سمت چپ نتایج مدلسازی با آسیای مدل و تصاویر سمت راست نتایج مدلسازی با نرم‌افزار KMPC_{DEM} را نشان می‌دهد. تصاویر ۵-۱ تا ۵-۴ نتایج مربوط به آستر نوع اول و ۵-۵ تا ۵-۸ تصاویر نتایج مربوط به آستر دوم را نشان می‌دهد. در شکل ۵، هر ردیف از تصاویر نتایج یک مورد از مطالعات نشان می‌دهد.

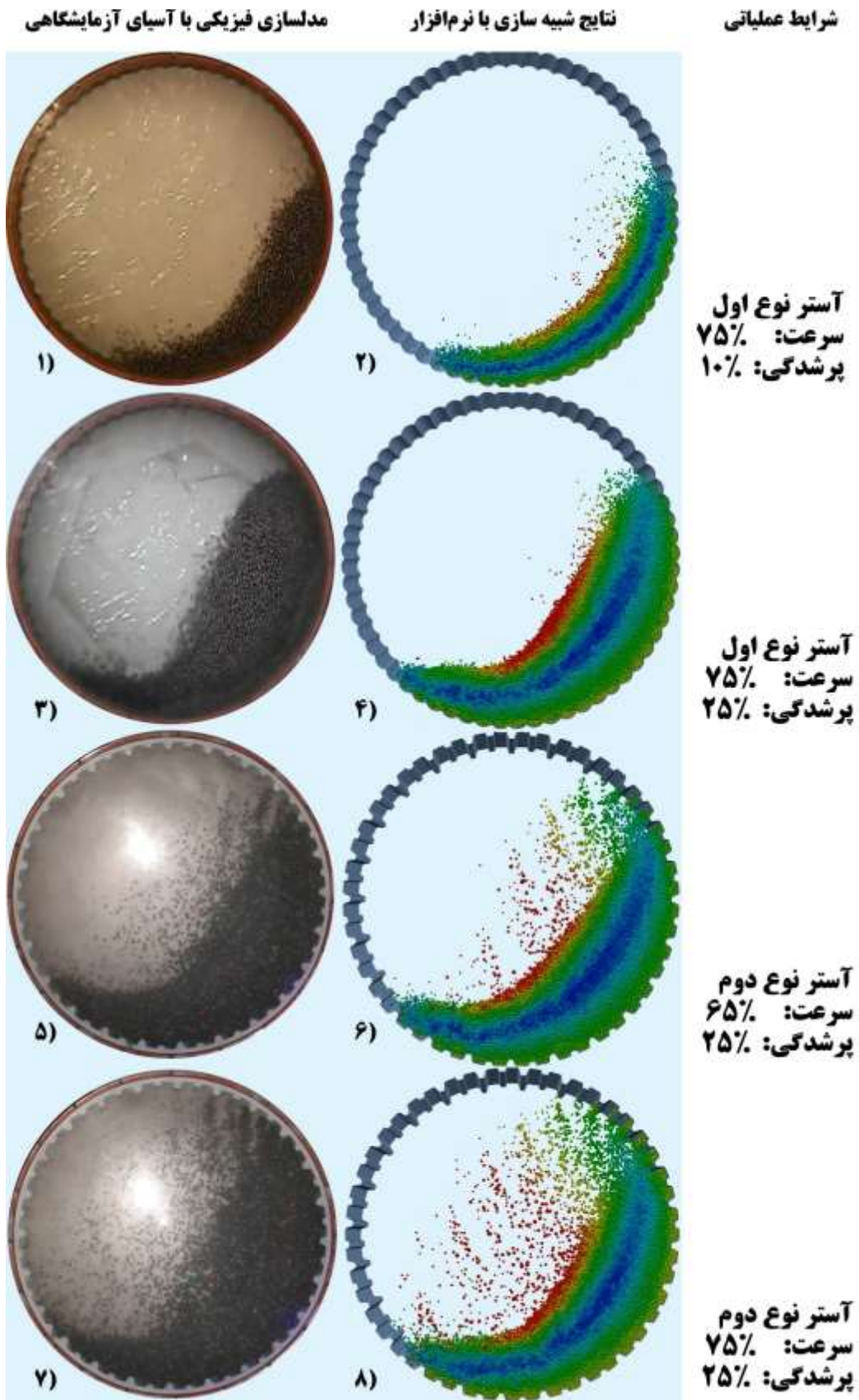
در مرحله بعد، این دو مدل آستر در محیط نرم‌افزار Solidworks ترسیم و برای انجام شبیه‌سازی به طور جداگانه وارد نرم‌افزار KMPC_{DEM} شد. کلیه شرایط شبیه‌سازی منطبق با شرایط آزمایش‌های انجام شده با آسیای آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. در نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی همین آسیا با طول‌های بیشتر نیز وجود داشت ولی از آنجا که انطباق کامل آن با آسیای آزمایشگاهی مهم‌ترین اصل بود، بنابراین طول آسیا در این شبیه‌سازی‌ها، دقیقاً منطبق بر شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. ضریب اصطکاک، نسبت پواسون و ضریب استرداد ذرات به ترتیب برابر ۰/۲۵، ۰/۲۵ و ۰/۷۵ و مدول الاستیسیته ذرات برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال (مدول الاستیسیته گلوله‌های فولادی) در نظر گرفته شد، هرچند که در چند سال گذشته محققان این رشته با انتخاب مقادیر خیلی کمتر از مقدار واقعی مدول الاستیسیته مواد (حتی تا چند ده هزار برابر کوچکتر از مقدار واقعی)، مقدار نفوذ بالا بازه زمانی شبیه‌سازی را بیشتر کرده است تا سرعت محاسبات را بالا ببرند بدون آنکه تغییر محسوسی در نتایج شبیه‌سازی مشاهده کنند [۲۰].

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، ۱۰ تصویر تهیه و با نتایج مرحله قبل مقایسه شد. برای کمی کردن این مقایسه‌ها، موقعیت محل شانه و پاشنه بار، به عنوان معیار در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، محل شانه و پاشنه بار در تمامی تصاویر تهیه‌شده از شبیه‌سازی‌ها و آسیای آزمایشگاهی با استفاده از نقاله دیجیتال MB-Ruller که یک نرم‌افزار تحت ویندوز است، اندازه‌گیری شد. در این اندازه‌گیری‌ها راس نقاله منطبق بر مرکز آسیا و مبدا اندازه‌گیری منطبق با موقعیت ساعت ۳ و جهت اندازه‌گیری‌ها به صورت پادساعت‌گرد در نظر گرفته شد.

۴-۲- آسیاهای نیمه‌خودشکن مجتمع سنگ آهن گل‌گهر و

مجتمع مس سرچشمه

هدف اصلی این تحقیق دستیابی به طرح آستری مناسب برای این دو آسیا به منظور افزایش کارایی خردایش بود، بنابراین این دو آسیا با در نظر گرفتن کلیه خصوصیات آنان از جمله قطر، تعداد آسترها و شکل آسترها که در مقدمه عنوان شد در نرم‌افزار Solidworks ترسیم شد، سپس این هندسه‌ها به صورت جداگانه در نرم‌افزار KMPC_{DEM} فراخوانی و شرایط عملیاتی هر یک از جمله سرعت و پرتدگی در نرم‌افزار وارد شد. در این شبیه‌سازی‌ها دانه‌بندی ذرات مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شد.



شکل ۵- مقایسه نتایج شبیه سازی با نرم افزار KMPCDEM و مدلسازی با آسیای مدل (رنگ ها بر اساس سرعت ذرات: قرمز بالاترین)

جدول ۳- محل شانه و پاشنه شکل بار در تصاویر شکل ۵

شماره تصویر	موقعیت (درجه)		انحراف معیار (درجه)	
	شانه	پاشنه	شانه	پاشنه
۱	۱۴٫۶	۲۴۸٫۶	۲٫۱	۲٫۶
۲	۱۴٫۸	۲۴۵٫۶	۲٫۰	۲٫۲
۳	۳۵٫۹	۲۲۶٫۸	۲٫۳	۲٫۶
۴	۳۴٫۱	۲۲۴٫۹	۲٫۴	۲٫۳
۵	۴۵٫۴	۲۲۰٫۸	۲٫۹	۳٫۵
۶	۴۷٫۷	۲۲۳٫۵	۲٫۸	۳٫۱
۷	۶۱٫۵	۲۲۵٫۴	۳٫۷	۳٫۹
۸	۶۰٫۱	۲۲۹٫۲	۳٫۶	۳٫۸

علاوه بر این نتیجه که مهم‌ترین نتیجه حاصل از این بخش است، دو نکته دیگر نیز از جدول ۳ قابل برداشت است. نکته اول، انحراف معیار پایین‌تر موارد ۱ تا ۴ نسبت به موارد ۵ تا ۸ است. این افزایش انحراف معیار موارد ۵ تا ۸ ناشی از ارتفاع بالاتر و تعداد کمتر بالابرها در آستر است که باعث شده است اندازه‌گیری محل شانه و پاشنه بار نوسان بیشتری از خود نشان دهد. نکته دوم نیز انحراف معیار بالاتر تعیین موقعیت پاشنه نسبت به شانه است. دلیل بالا بودن انحراف معیار محل پاشنه دشواری تشخیص دقیق محل پاشنه نسبت به محل شانه است. این عامل باعث شده است که عموماً انحراف معیار پاشنه بار بیشتر از شانه بار به دست آید.

۴-۲- بهبود عملکرد آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع

سنگ آهن گل‌گهر

در بخش قبل نشان داده شد که نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ در شبیه‌سازی عملیات آسیاکنی دارای دقت قابل قبولی است، بنابراین از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی حرکت بار در این آسیا در ابعاد واقعی و با در نظر گرفتن کلیه شرایط عملیاتی استفاده شد (شکل ۶- الف). مسیر حرکت ذراتی که بیشترین بالابری را در آسیا دارند بسیار مهم است. عمده ذرات که به وسیله بالابرها بالا رفته‌اند، 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. اگر این بخش از انرژی پتانسیل ذرات که در اثر بالاروی مواد معدنی که عموماً ذرات با ابعاد ۱۰ سانتی‌متری‌اند، در موقع سقوط به خود ذرات وارد می‌شود، باعث بهبود بخش خردایش می‌شود. بخش دیگری از این مواد که بالابرده شده‌اند به موقعیت ساعت ۹ و بالاتر برخورد کرده‌اند. این دسته از مواد به دلیل اینکه طول مسیر سقوط آزاد

مقایسه دو ردیف اول و دوم تاثیر میزان پرشدگی را به تصویر می‌کشد. همانطور که پیداست با افزایش پرشدگی مواد، کشیدگی بار در هر دو سمت شانه و پاشنه بیشتر شده که این نشان‌دهنده افزایش طول مسیر حرکت مواد است.

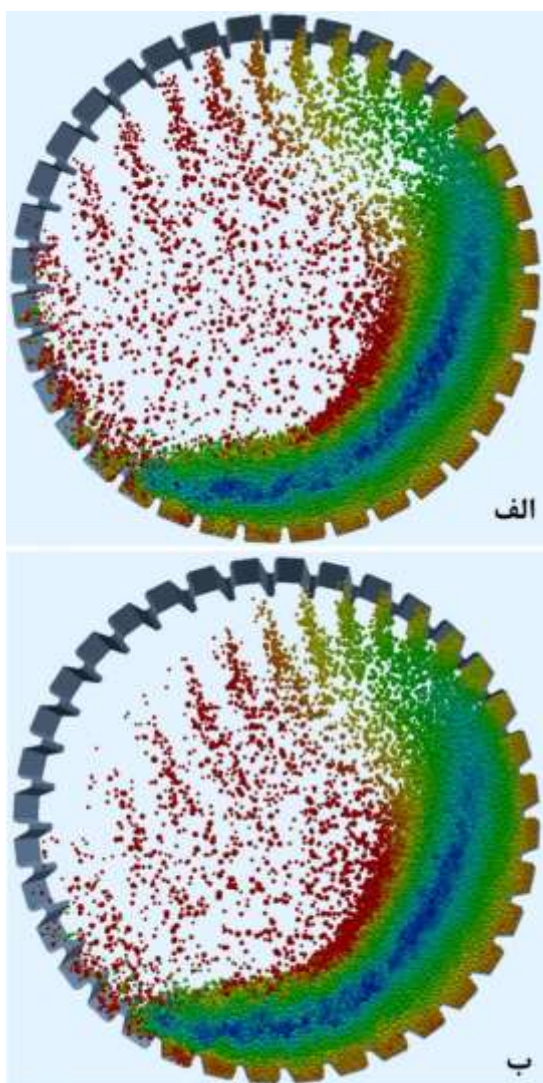
مقایسه ردیف سوم و چهارم تصاویر شکل ۵، تاثیر میزان سرعت را در شکل بار نشان می‌دهد. با افزایش سرعت آسیا، علاوه بر آن که فاصله محل شانه و پاشنه بار بیشتر شده است تعداد ذراتی که در حال پروازند نیز افزایش یافته است. با افزایش سرعت آسیا، سهم مکانیزم سایس کمتر شده و به سهم مکانیزم ضربه افزوده می‌شود. تغییر در مقدار بار در پرواز برای نشان دادن این پدیده به کار گرفته می‌شود.

مقایسه تصاویر ردیف دوم و چهارم از شکل ۵ نیز تاثیر نوع آستر بر حرکت بار را نشان می‌دهد. تغییر نسبی شکل بار به واسطه تغییر طرح آستر به طور نسبی بیش از تاثیر سرعت و پرشدگی است که نشان‌دهنده اهمیت شکل آستر است. در این دو ردیف، هر دو آسیا دارای سرعت ۷۵ درصد سرعت بحرانی و پرشدگی ۲۵ درصدند. اما تفاوت چشمگیری در شکل بار این دو آسیا مشاهده می‌شود. در تصاویر ردیف چهارم میزان ذرات در حال پرواز بسیار بیشتر است و مکانیزم خردایش از نوع ضربه، غالب شده است؛ در حالی که در تصاویر ردیف دوم عمده مواد روی هم می‌غلطند و مکانیزم سایس، مکانیزم غالب خردایش است.

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ ، دو تصویر درج شده در هر ردیف باید با هم مقایسه شوند. به طور کلی شکل بار و مسیر حرکت ذرات که با استفاده از نرم‌افزار $KMPC_{DEM}$ به دست آمده است، به نتایج به دست آمده از آزمایش نزدیک است اما برای مقایسه دقیق این نتایج، با توجه به روشی که در بخش قبل معرفی شد، محل شانه و پاشنه هر یک از تصاویر اندازه‌گیری شد. خلاصه این نتایج در جدول ۳ آمده است. مقایسه دو به دو نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آسیای مدل، در محل پاشنه بار تصاویر ۷ و ۸ رخ داده و مقدار آن کمتر از چهار درجه است. با توجه به انحراف معیار اندازه‌گیری‌ها در این دو مورد که به طور متوسط ۳٫۹ درجه است، می‌توان گفت که این تفاوت چهار درجه‌ای در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نیست. در سایر حالات نیز این اختلاف کمتر است و می‌توان گفت نتایجی که از این نرم‌افزار به دست آمده است، با نتایج آسیای مدل سازگاری بالایی دارد و می‌توان از آن برای سایر مطالعات استفاده کرد.

P ₈₀ (میکرومتر)	ظرفیت ورودی (تن / ساعت)	دوره زمانی (ماه)	
۵۱۶±۴۴	۴۱۹±۶۷	۱۸	قبل از تعویض
۵۱۳±۳۶	۴۸۹±۴۶	۲	بعد از تعویض

نکته مهم دیگر، کاهش انحراف معیار دانه بندی و ظرفیت آسیا است که دلیل آن بیشتر شدن توانایی این آسیا در خرد کردن سنگ های با ابعاد و دانسیته های مختلف است.



شکل ۶- نتایج شبیه سازی آسیای نیمه خود شکن مجتمع سنگ آهن گل گهر با آسترهای الف) طرح اصلی و ب) طرح پیشنهادی

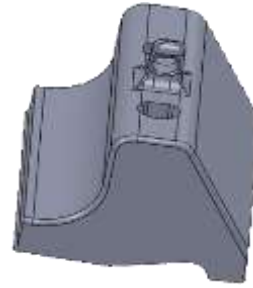
آن ها کم است، در هنگام برخورد، سرعت زیادی ندارند. به عبارت دیگر، ذراتی که هنگام سقوط قطر آسیا را می پیمایند، در لحظه برخورد، بیشترین سرعت و در نتیجه بیشترین پتانسیل خردکنندگی و خردشوندگی را دارند. اگر آسیا دارای سرعت متغیر بود و این آزادی عمل وجود داشت که بتوان آسیا را با هر سرعتی به گردش درآورد، با کاهش سرعت، مسیر حرکت مطلوب ذرات فراهم می شد. اما از آنجا که سرعت این آسیا ثابت است، تنها گزینه پیش رو، تغییر طرح آسترها است. در همین راستا، طرح های جایگزین آسترها پیشنهاد و با استفاده از نرم افزار $KMPC_{DEM}$ ، شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با بررسی نتایج مشخص شد که 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 ۶- ب)، بخش عمده ای از مواد در حال پرواز که در طرح اصلی مستقیماً به آسترها برخورد می کردند، در این طرح به پاشنه بار برخورد می کنند. این باعث می شود که علاوه بر مواد در حال پرواز که خودشان مستعد خردایش اند، مواد دیگری که در پاشنه بار وجود دارند را نیز خرد کنند.

بخش دیگری از مواد بالابرد شده که در طرح اصلی مسیر کوتاهی را طی می کردند نیز در این طرح حذف شدند که این باعث کاهش هدرروی توان آسیا شد. به عبارت دیگر، بعد از تغییر طرح آستر و افزایش زاویه صفحه بالابر آستر، حرکت بار به نحوی شد که محل برخورد آبخاری بزرگ بار به محل پاشنه بار تغییر کرد. در نتیجه قسمت اعظم شکست که ناشی از ضربات واسطه خردایش است، علاوه بر خردشدن خود باعث خردایش سایر مواد شدند.

در نهایت با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی و محدودیت های مربوط به حمل و نصب آسترهای این آسیا، نقشه های صنعتی طرح نهایی پیشنهادی ترسیم و برای ساخت به ریخته گری ارسال شد (شکل ۷). آسترهای ساخته شده، در یکی از آسیاها نصب و عملکرد آن پایش شد. در جدول ۴ مقادیر تناژ ورودی و P_{80} (اندازه ای که ۸۰ درصد ذرات از آن کوچک ترند) آسیا طی ۳ دوره قبل و پس از تعویض آستر نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با تغییر طرح آسترها تناژ ورودی آن افزایش یافت ولی دانه بندی محصول آن ثابت ماند. بنابراین، با افزایش نرخ شکست سنگ و در نتیجه رشد ساز و کار ضربه، می توان با حفظ دانه بندی، ظرفیت مطلوبی را به دست آورد.

جدول ۴- تاثیر تعویض آستر در تناژ آسیای نیمه خود شکن گل گهر



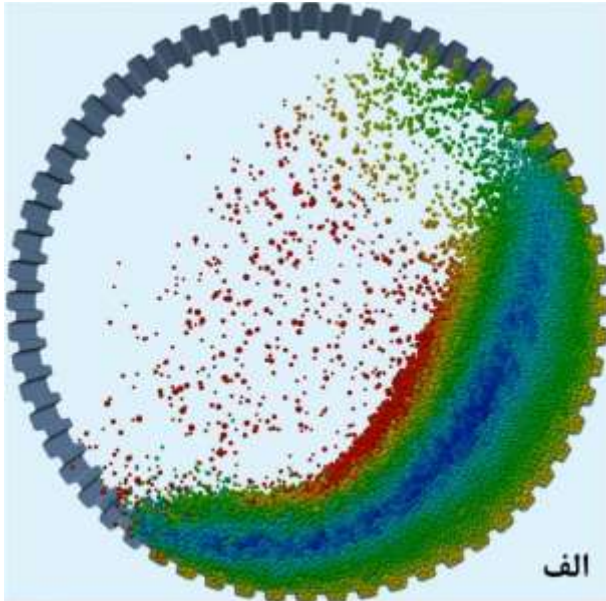
شکل ۷- طرح نهایی آسترهای پیشنهادی آسیای نیمه خودشکن سنگ آهن گل گهر

۴-۳- بهبود عملکرد آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه

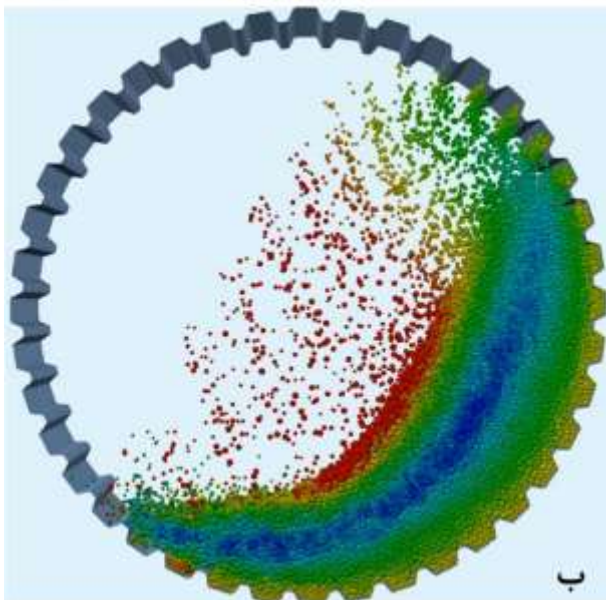
مشابه اقداماتی که در مورد آسیای نیمه خودشکن گل گهر انجام شد، در این بخش در مورد آسترهای آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه انجام شد. در شکل ۸-ا نتایج شبیه سازی این آسیا با در نظر شرایط عملیاتی آن نشان داده شده است.

در شکل ۸-الف مشاهده می شود که بخش قابل توجهی از ذرات در حال پرواز که از ارتفاع حدودا ۱۰ متری (قطر آسیا) رها می شوند، مستقیما به بدنه آسیا برخورد می کنند. اما به دلیل آن که قطر این آسیا بیشتر از آسیای نیمه خودشکن گل گهر است، احتمال ایجاد شکست در آسترهای این آسیا به مراتب بیشتر از آسیای گل گهر است. در نتیجه، برخورد مستقیم بار به آسترها علاوه بر اینکه می تواند باعث کاهش تناژ شود، باعث شکست آسترها می شود که از نظر زیان عملیاتی به دلیل نیاز به زمان توقف طولانی برای تعویض آن ها، بارزتر است.

از آنجا که تغییر سرعت در این آسیا نیز غیرقابل دسترس بود، تغییر طرح آستر مورد توجه قرار گرفت. پس از مطالعه طرح های پیشنهادی مختلف و شبیه سازی آن ها با نرم افزار $KMPC_{DEM}$ ، 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 ۸-ب). تقریبا همه مواد در حال پرواز روی پاشنه بار سقوط می کنند. به عبارت دیگر، ضربات مستقیم ذرات به آستر به کمترین مقدار ممکن رسیده است. سپس مانند بخش قبل، با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت های عملیاتی، نقشه صنعتی طرح پیشنهادی این آسترها ترسیم و برای ساخت به ریخته گری ارسال شد. از آنجا که این آسیا برای نصب ۶۰ ردیف آستر ساخته شده بود، بنابراین برای تغییر این تعداد به ۴۰ ردیف آستر، به ناچار چهار نوع آستر ساخته شد تا منطبق بر پیچ های بدنه آسیا شوند.



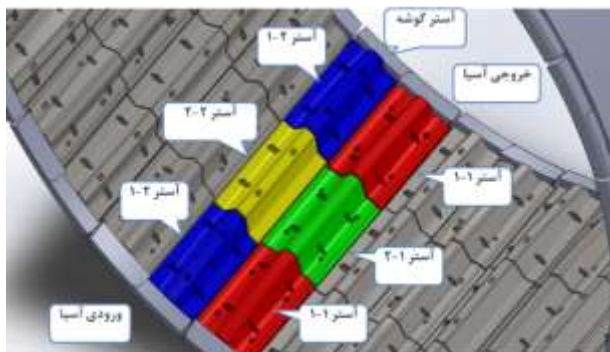
الف



ب

شکل ۸- نتایج شبیه سازی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه با آسترهای الف) طرح اصلی و ب) طرح پیشنهادی

پس از ساخت آسترها و تعویض آن ها با آسترهای طرح اصلی، این آسیا تا پایان عمر آسترهای پیشنهادی مورد پایش دقیق قرار گرفت. مقایسه متوسط تناژهای دو دوره قبل و بعد از تعویض آسترها نشان داد که نرخ خوراک ورودی به آسیا از میزان ۸۶۰ تن به ۸۷۸ تن بر ساعت، بدون تغییر محسوس در دانه بندی محصول، افزایش یافته است. در مدار خردایش سرچشمه آنچه که اندازه گیری می شود، درصد ذرات عبوری از سرنده ۲۰۰ مش در سرنده سیکلون انتهایی مدار خردایش است چون رویکرد کنترل تناژ ورودی به این آسیا به این صورت است که تناژ باید به اندازه ای باشد که اندازه محصول در سرنده سیکلون باید ۷۰ درصد کوچکتر از ۲۰۰ مش باشد. حال اگر درصد ذرات زیر ۲۰۰



شکل ۹- طرح نهایی آسترهای پیشنهادی آسیای نیمه خود شکن مجتمع مس سرچشمه

۵- نتیجه گیری

- نرم افزار $KMPC_{DEM}$ برای شبیه سازی حرکت بار در آسیا با دو نوع آستر در شرایط مختلف استفاده شد و نتایج آن با نتایج مدل سازی فیزیکی با به کارگیری آسیای مدل با قطر ۱ متر، مقایسه شد.

- مقایسه محل شانه و پاشنه بار در این شبیه سازی ها و مدل سازی ها نشان داد که بیشترین اختلاف بین نتایج روش اجزای گسسته و مدل سازی فیزیکی در محل پاشنه بار و کمتر از ۴ درجه است که با توجه به نوسان اندازه گیری ها این مقدار اختلاف معنی دار نبود که نشان از دقت مناسب نرم افزار در پیش بینی مسیر حرکت بار داشت.

- آسیاهای نیمه خود شکن مجتمع مس سرچشمه و مجتمع سنگ آهن گل گهر در ابعاد واقعی و با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی آن ها با استفاده از نرم افزار $KMPC_{DEM}$ شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که مسیر حرکت بار در این آسیاها به نحوی است که عمده مواد حاضر در آبشاری بزرگ، به جای برخورد با پاشنه بار، مستقیماً به آستر برخورد می کنند.

- مطالعه طرح های مختلف و شبیه سازی آن ها با استفاده از نرم افزار $KMPC_{DEM}$ نشان داد که در مورد آسیای گل گهر زاویه بالابرها باید از ۷ به ۳۰ درجه تغییر یابد تا مسیر حرکت بار در آسیا مناسب شود. در مورد آسیای مجتمع مس سرچشمه نیز مشخص شد که بهترین مسیر حرکت بار زمانی ایجاد می شود که تعداد بالابرها از ۶۰ به ۴۰ عدد کاهش و زاویه بالابرها از آن ها از ۱۵ به ۳۰ درجه افزایش یابد.

- طرح های پیشنهادی نهایی برای هر دو آستر به صورت جداگانه و با در نظر گرفتن محدودیت ها و شرایط عملیاتی، ترسیم و برای ساخت به ریخته گری ارسال شد. پس از نصب آسترها در آسیاهای مربوط، عملکرد این دو آسیا پایش شد.

مش کم شود، یعنی ذرات درشت تر شده و برای اینکه از درشت شدن ذرات جلوگیری شود، باید تناژ ورودی به آسیای نیمه خود شکن کم شود اما اگر درصد ذرات عبوری از ۲۰۰ مش بیش از ۷۰ درصد شود عملاً بیش خردایش انجام گرفته و این بدین معنی است که آسیا می تواند تناژ بیشتری را قبول کند و تناژ ورودی به آن افزایش یابد. در نتیجه می توان عنوان کرد که تناژ آسیا به نحوی تعیین می شود که همواره دانه بندی مدنظر تامین شود.

یکی از مباحث مهمی که در کارخانه های فرآوری بسیار مهم است، پایداری هرچه بیشتر و نوسان کمتر تجهیزات به ویژه آسیاهاست. از نظر فرآیندی هرچه نوسان تناژ آسیا بیشتر باشد، اعمال سیستم های کنترلی و در نهایت بهینه سازی آن ها بسیار دشوارتر و هزینه بر تر خواهد. نوسانات در آسیاها زمانی رخ می دهد که معمولاً ذرات درشت و یا ذرات سخت با ابعاد بحرانی وارد آسیاها شده اند و آسیاها قادر به خرد کردن آن ها نیست. در نتیجه برای اینکه بتوان بر این قشر از ذرات غلبه کرد باید تناژ ورودی آسیا را کاهش داد تا به آن فرصت خرد کردن این ذرات داده شود. پس از تغییر این طرح در آسیای سرچشمه و با توجه به اینکه احتمال برخورد مستقیم ذرات با آستر به حداقل رسید، این امکان فراهم شد که بتوان علاوه بر گلوله هایی با ابعاد ۸۰ میلی متر، گلوله هایی با ابعاد ۱۲۵ میلی متر نیز به آسیا اضافه کرد. این اضافه شدن گلوله های با ابعاد بزرگتر سبب شد که آسیا قادر باشد محدوده وسیع تری از ذرات مختلف را خرد کند. پس از انجام این کار، انحراف معیار این نرخ از ۱۰۴ به ۷۲ تن بر ساعت کاهش یافت که نشان دهنده انعطاف پذیری بیشتر آسیا در برابر نوسان سختی خوراک ورودی بود. به عبارت دیگر این کار باعث شد که تغییرات تناژ خوراک آسیا کمتر از قبل شود.

اما آنچه که در این آسیا بیشتر اهمیت داشت، کاهش تعداد شکست های آستر نسبت به دوره های قبل بود. پایش ها نشان داد که تعداد شکست آسترها از متوسط ۴/۲ قطعه به یک قطعه کاهش یابد. این امر باعث کاهش توقفات آسیا و در نتیجه افزایش زمان آماده به کار آسیا شد. ارزیابی ها نشان داد که تناژ از دست رفته ناشی از کاهش توقفات آسیا و تعویض آسترها، حدود ۴۱ درصد کاهش یافت.

- [8] B. K. Mishra and R. K. Rajamani, "The discrete element method for the simulation of ball mills," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 16, no. 11, pp. 598-604, 1992.
- [9] P. W. Cleary, "Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods," *Minerals Engineering*, vol. 11, pp. 1061-1080, 1998.
- [10] N. Djordjevic, R. Morrison, and B. Loveday, "Modelling comminution patterns within a pilot scale AG/SAG mill," *Minerals Engineering*, vol. 19, pp. 1505-1516, 2006.
- [11] A. Refahi, J. Aghazadeh Mohandesi, and B. Rezai, "Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crusher," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 94, no. 1-2, pp. 83-91, 2010.
- [12] M. Rezaeizadeh, M. Fooladi, M. S. Powell, and S. H. Mansouri, "Experimental observations of lifter parameters and mill operation on power draw and liner impact loading," *Minerals Engineering*, vol. 23, no. 15, pp. 1182-1191, 2010.
- [13] M. Jahani, A. Farzanegan, and M. Noaparast, "Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver," *Powder Technology*, vol. 283, pp. 32-47, 2015.
- [14] L. Xu, K. Luo, and Y. Zhao, "Numerical prediction of wear in SAG mills based on DEM simulations," *Powder Technology*, vol. 329, pp. 353-363, 2018.
- [15] X. Bian, G. Wang, H. Wang, S. Wang, and W. Lv, "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*, vol. 105, pp. 22-35, 2017.
- [16] P. Gy, "Sampling of particulate materials: Theory and Practice," Elsevier, 1979.
- [17] قاسمی، علیرضا؛ موسوی، سیدامید؛ بنیسی، صمد؛ ۱۳۹۲؛ "تأثیر گام زمانی بر دقت نتایج در شبیه‌سازی حرکت ذرات به روش اجزای گسسته (راگ)،" روش‌های عددی و تحلیلی در مهندسی معدن، جلد شش، صفحات ۲۳ تا ۳۲.
- تعویض آسترهای آسیای گل‌گهر باعث شد که متوسط تناژ آسیا از ۴۱۹ به ۴۸۹ تن بر ساعت افزایش یابد و نوسان آن ۳۱ درصد کاهش داشته باشد.
- 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. این امر باعث کاهش توقفات آسیا و در نتیجه کاهش هدرروی فرصت تولید به میزان ۴۱ درصد شد.
- تقدیر و تشکر**
- بدین‌وسیله از کلیه اعضای محترم مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر، کارکنان و مسوولین مجتمع مس سرچشمه و مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر که ما را در راستای این پژوهش یاری کردند، کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.
- مراجع**
- [1] R. D. Morrison and P. W. Cleary, "Using DEM to compare the energy efficiency of pilot scale ball and tower mills," *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 665-672, 2009.
- [2] M. Maleki-Moghaddam, M. Yahyaei, and S. Banisi, "Converting AG to SAG mills: The Gol-E-Gohar Iron Ore Company case," *Powder Technology* vol. 217, pp. 100-106, 2012.
- [3] M. Maleki-Moghaddam, M. Yahyaei, and S. Banisi, "A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills," *Minerals Engineering*, vol. 46-47, pp. 157-166, 2013.
- [4] M. Yahyaei and S. Banisi, "Spreadsheet-based modeling of liner wear impact on charge motion in tumbling mills," *Minerals Engineering*, vol. 23, pp. 1213-1219, 2010.
- [5] S. Morrell, "The prediction of power draw in wet tumbling mills," PhD Thesis, The University of Queensland, School of Engineering, 1993.
- [6] S. Martins, W. Li, P. Radziszewski, A. Faucher, and S. Makni, "Experimental and simulated instrumented ball in a tumbling mill—A comparison," *Minerals Engineering*, vol. 43-44, pp. 79-84, 2013.
- [7] P. A. Cundall, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Geotechnique*, vol. 29, pp. 47-65, 1979.

- [18] P. Cleary, "Discrete element modeling of industrial granular flow applications," Task quarterly 2 no 3, vol. 2, pp. 385-416, 1998.
- [19] M. Maleki-Moghaddam, A. R. Ghasemi, M. Yahyaei, and S. Banisi, "The impact of end-wall effect on the charge trajectory in tumbling model mills," International Journal of Mineral Processing, vol. 144, pp. 75-80, 2015.
- [20] S. Lommen, D. Schott, and G. Lodewijks, "DEM speedup: Stiffness effects on behavior of bulk material," Particuology, vol. 12, pp. 107-112, 2014.

بی نوشت

- 1- Cundall
- 2- Mishra
- 3- Rajamani
- 4- Cleary
- 5- Grinding Media Trajectory
- 6- DEM- Discrete Element Method