

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی

بررسی تأثیر توزیع اندازه و نوع گلوله بر مکانیزم خردایش آسیاهای
گلوله‌ای به روش اجزای گسسته – مطالعه موردی: آسیای گلوله‌ای شرکت
آسفالت طوس سنگان

نگارنده: ایمان فهیمی خویردی

استاد راهنما:

دکتر محمد جهانی چگنی

استاد مشاور:

دکتر اصغر عزیزی

شهریور ۱۳۹۹

شماره: ۹۶۹۹/۴۱۹۵
تاریخ: ۹۹/۱/۱۰

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای ایمان فهیمی خویردی با شماره دانشجویی ۹۷۱۲۷۳۴ رشته معدن گرایش فرآوری مواد معدنی تحت عنوان : پروپوزال (پایان نامه) بررسی تاثیر توزیع اندازه و نوع گلوله بر مکانیزم خردایش آسیاهای گلوله ای به روش اجزای گسسته (راگ) - مطالعه موردی : آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان خواف که در تاریخ ۹۹/۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

- الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۹ ☒
ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد جهانی		
۲- استاد راهنمای دوم		-	-
۳- استاد مشاور	دکتر اصغر عزیزی		
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ سرشکی	(م)	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمد کارآموزیان		
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر کیومرث سیف پناهی		

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به
پدر و مادر بزرگوارم

آنانکه وجودم برایشان همه زحمات بود و وجودشان برایم همه مهر.

آنان که مویشان سپید شد تا به اینجا برسم و آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی روشنیشان
سرمایه های جاودانه زندگی من است.

آنان که راستی قامتشان در شکستگی قامتشان تجلی یافت و همه تلاششان موفقیت من است و
هیچ چیز را در طول زندگایم از من دریغ نکرده اند.

و، همسر عزیزتر از جانم

که در طول این یک سال پایه پای من تمام سختی را به جان خرید و همیشه مایه دلگرمی من بود.
خواهر و برادر که وجودشان باعث افتخار من است.

تشکر و قدردانی

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از زحمات سرشار اساتید محترم جناب آقای دکتر محمد جهانی چگنی و دکتر اصغر عزیزی که با راهنمایی‌های بی‌دریغشان، اینجانب را در طول این مدت و در امر تهیه این پژوهش یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی به عمل آورم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از آقای دکتر محمد عطایی به خاطر در اختیار قرار دادن ابرایانه مورد نیاز جهت انجام شبیه‌سازی‌های راگ، دوست عزیزم مهندس سجاد کلاهی و پرسنل شرکت آسفالت طوس جهت همکاری‌شان به منظور انجام این پایان‌نامه، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورم.

تعهد نامه

اینجانب ایمان فهیمی خویردی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر توزیع اندازه و نوع گلوله بر مکانیزم خردایش آسیاهای گلوله‌ای به روش اجزای گسسته – مطالعه موردی: آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان تحت راهنمایی دکتر محمد جهانی چگنی متعهد میشوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ:

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

رساندن ذرات به درجه آزادی مناسب در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی از اهمیت بالایی برخوردار است که این امر توسط چندین مرحله سنگ‌شکنی و آسیاکنی انجام می‌شود. آسیاهای گلوله‌ای معمولاً در آخرین مرحله از مدار خردایش قرار می‌گیرند و بیشترین نقش را در این خصوص بر عهده دارند. دو مکانیزم اصلی خردایش در آسیاهای گردان عبارتند از ضربه و سایش. به منظور بهبود عملکرد آسیاهای گلوله‌ای لازم است نقش مکانیزم ضربه پررنگ‌تر و نقش مکانیزم سایش کمرنگ‌تر شود. این کار با ایجاد نقاط شانه، پاشنه و با یافتن توزیع مناسب از ترکیب گلوله‌ها امکان‌پذیر است. هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آسیای گلوله‌ای مدار خردایش کارخانه فرآوری آسفالت طوس سنگان خواف با نرم‌افزار لایتز می‌باشد. مدار خردایش کارخانه مذکور شامل آسیاکنی خشک (HPGR) و دو آسیای گلوله‌ای موازی مدار بسته با یک مجموعه هیدروسیکلون است. با توجه به اینکه آسیا نقش کلیدی در راندمان کلی فرآیند دارد، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین ارتفاع شانه بار ایجاد شده توسط توزیع با ترکیب اندازه گلوله‌های ۴، ۶، ۱۰ سانتیمتری به میزان ۴۷۸/۷۵ سانتیمتر بود؛ که در مقایسه با ارتفاع شانه بار ایجاد شده توزیع با ترکیب اندازه گلوله‌های ۴، ۶ سانتیمتری به میزان ۴۶۱/۷۹ سانتیمتر که در حال حاضر در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس مورد استفاده قرار می‌گیرد حدود ۱۷/۷۹ سانتیمتر بیشتر بود. لذا، پیشنهاد می‌شود به جای استفاده از ترکیب حاضر در آسیای شرکت فوق از این ترکیب جدید برای بهبود عملکرد آن استفاده شود. همچنین انرژی بار خردکننده آسیای گلوله‌ای کارخانه مذکور مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر پانزده توزیع مختلف اندازه با درصد حجمی یکسان از ترکیب گلوله‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتیمتری بر انرژی بار خردکننده (مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل کل گلوله‌ها) در آسیای گلوله‌ای معدن سنگان به روش اجزای گسسته (راگ) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کمترین میزان انرژی منتقل‌شده از آسیا به بار خردکننده مربوط به توزیع ۴ سانتیمتری به میزان ۱۷۴۵/۷۲۶ kJ بود. همچنین بیشترین میزان انرژی

منتقل شده از آسیا به گلوله‌ها به ترتیب مربوط به توزیع ۱۰ سانتیمتری به میزان $6791/432 \text{ kJ}$ ، توزیع (۴، ۶، ۱۰) سانتیمتری به میزان $6598/39 \text{ kJ}$ ، و توزیع (۶، ۱۰) سانتیمتری به میزان $6576/04 \text{ kJ}$ بود. در نتیجه می‌توان به جای گلوله‌های ۴ و ۶ سانتیمتری که حدود $2830/546 \text{ kJ}$ انرژی از آسیا دریافت می‌کنند و در حال حاضر در معدن مذکور استفاده می‌شود، از توزیع (۴، ۶، ۱۰) سانتیمتری با توجه به بیشترین ارتفاع بار و انرژی، استفاده کرد و بدین طریق عملکرد آسیا را بهبود بخشید. همچنین به منظور بررسی تاثیر نوع گلوله‌ها، شبیه‌سازی حالت بهینه یعنی ترکیب گلوله‌های ۴، ۶ و ۱۰ سانتیمتری برای گلوله‌های سرامیکی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که گلوله‌های سرامیکی با اینکه ارتفاع شانه بار بیشتری ایجاد می‌کنند، اما انرژی بار خردکننده ($3196/74 \text{ kJ}$) بسیار کمتری نسبت به گلوله‌های فولادی ($6598/397 \text{ kJ}$) ایجاد می‌کنند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود از گلوله‌های فولادی در معدن سنگان استفاده شود.

واژه‌های کلیدی : مکانیزم خردایش، آسیای گلوله‌ای، توزیع اندازه گلوله‌ها، روش اجزای گسسته، ارتفاع شانه بار، انرژی بار خردکننده

فهرست مطالب

فصل اول:	۱
کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- آسیای گلوله ای	۲
۳-۱- پارامترهای موثر بر کارایی آسیاهای گلوله ای	۳
۱-۳-۱- ابعاد و مقدار گلوله شارژشده به داخل آسیای گلوله ای	۳
۲-۳-۱- سرعت آسیا	۷
۳-۳-۱- درصد جامد پالپ داخل آسیا	۹
۴-۳-۱- شکل روزنه خروجی آسیا	۱۰
۴-۱- هدف از انجام تحقیق	۱۰
۵-۱- ضرورت انجام تحقیق	۱۰
۶-۱- معرفی کنسارهای سنگ آهن سنگان خواف و شرایط جغرافیایی آن	۱۰
۷-۱- معرفی کارخانه فرآوری شرکت آسفالت طوس سنگان خواف	۱۲
۸-۱- روش اجزای گسسته (DEM)	۱۶
فصل دوم:	۱۹
مروری بر کارهای گذشته	۱۹
۱-۲- مقدمه	۲۰
۲-۲- شبیه سازی های انجام شده آسیای گلوله ای	۲۱
فصل سوم:	۳۱
روش تحقیق	۳۱
۱-۳- روش شبیه سازی نرم افزار (DEM)	۳۲
۲-۳- پیکربندی آسیای گلوله ای	۳۷
۳-۳- روش محاسبه تعداد گلوله استفاده شده در شبیه سازی آسیای گلوله ای	۳۹
فصل چهارم:	۴۳
نتایج و بحث	۴۳
۱-۴- نتایج و بحث	۴۴

۴-۲- روش بدست آوردن ارتفاع بار	۴۷
فصل پنجم:	۵۹
نتیجه گیری و پیشنهاد	۵۹
۵-۱ نتیجه گیری و پیشنهادها	۶۰
منابع و مأخذ	۶۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: تصویری از یک آسیای گلوله ای [۱] ----- ۳
- شکل ۱-۲: ارتباط تابع انتخاب (نرخ شکست ذرات) با ابعاد ذرات و ابعاد گلوله ها در آسیا [۳] ----- ۴
- شکل ۱-۳: تاثیر ابعاد گلوله بر آهنگ خردایش [۴] ----- ۵
- شکل ۱-۴: تغییرات توانکشی آسیا گلوله ای با تغییر پرشدگی آن با گلوله [۱] ----- ۶
- شکل ۱-۵: نحوه حرکت بار داخل آسیا و نواحی مختلف خردایش بسته به سرعت آسیا [۱] ----- ۷
- شکل ۱-۶: ارتباط بیشترین ارتفاع سقوط با سرعت و درجه پرشدگی آسیا [۵] ----- ۸
- شکل ۱-۷: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه اکتشافی (بدون مقیاس) [۹] ----- ۱۱
- شکل ۱-۸: موقعیت آنومالی های معدن سنگان [۹] ----- ۱۲
- شکل ۱-۹: فلوشیت کارخانه پریارکنی آسفالت طوس سنگان خواف [۹] ----- ۱۴
- شکل ۱-۱۰: تصاویر جهات مختلف از آسیای گلوله ای کارخانه فرآوری شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۱۵
- شکل ۱-۱۱: تصویر قسمت ترانسیون خوراک آسیای گلوله ای ----- ۱۵
- شکل ۱-۲: نمونه ای از تصاویر تولیدشده توسط شبیه سازی عددی سه بعدی [۵۲] ----- ۲۵
- شکل ۲-۲: مدلسازی نحوه حرکت بار در داخل آسیا برای سه طرح مختلف بالابر (الف-دندانهای، ب-موجی، ج-مستطیلی) [۵۳] ----- ۲۶
- شکل ۱-۳: نقشه آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۳۷
- شکل ۲-۳: هندسه های (الف) دو بعدی و (ب) سه بعدی آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۳۸
- شکل ۳-۳: تصویر داخل آسیا در حالت ساکن ----- ۳۹
- شکل ۱-۴: تصاویر شبیه سازی های سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع تک گلوله ای هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی ----- ۴۵
- شکل ۲-۴: تصاویر شبیه سازی های سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع دو گلوله ای هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی ----- ۴۶
- شکل ۳-۴: تصاویر شبیه سازی های سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع سه گلوله ای هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی ----- ۴۶
- شکل ۴-۴: تصاویر شبیه سازی های سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع چهار گلوله ای هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی ----- ۴۷
- شکل ۵-۴: استفاده از نقاله آنالین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار توزیع تک گلوله ای در شبیه سازی های راگ ----- ۴۸
- آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۴۸

- شکل ۴-۶: استفاده از نقاله آنالاین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار توزیع دو گلوله ای در شبیه سازیهای راگ آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۴۸
- شکل ۴-۷: استفاده از نقاله آنالاین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار توزیع سه گلوله ای در شبیه سازی های راگ آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۴۹
- شکل ۴-۸: استفاده از نقاله آنالاین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار توزیع چهار گلوله ای در شبیه سازی های راگ آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۴۹
- شکل ۴-۹: ارتفاع شانه بار برای پانزده توزیع مختلف از اندازه بار خرد کننده در آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۵۰
- شکل ۴-۱۰: تصویر شبیه سازی سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله ای با گلوله سرامیکی، با توزیع مختلف اندازه گلوله ها هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی ----- ۵۱
- شکل ۴-۱۱: استفاده از نقاله آنالاین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار در شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای با گلوله سرامیکی، با توزیع های مختلف اندازه گلوله ها هنگامی که آسیا ۸۰٪ سرعت بحرانی اش میچرخد. ----- ۵۲
- شکل ۴-۱۲: مقایسه ارتفاع شانه بار حالت بهینه برای گلوله فولادی و سرامیکی از اندازه بار خرد کننده در آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۵۲
- شکل ۴-۱۳: مقایسه مقادیر (الف) انرژی پتانسیل، (ب) انرژی جنبشی، و (ج) انرژی کل، بار خردکننده حالت بهینه برای گلوله فولادی و سرامیکی از اندازه بار خرد کننده در آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۵۳
- شکل ۴-۱۴: تصاویر سه بعدی (دید از بغل) شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای سنگان با توزیع تک گلوله ای در ۸۰٪ سرعت بحرانی ----- ۵۵
- شکل ۴-۱۵: تصاویر سه بعدی (دید از بغل) شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای سنگان با توزیع دو گلوله ای در ۸۰٪ سرعت بحرانی ----- ۵۵
- شکل ۴-۱۶: تصاویر سه بعدی (دید از بغل) شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای سنگان با توزیع سه و چهار گلوله ای در ۸۰٪ سرعت بحرانی ----- ۵۶
- شکل ۴-۱۷: مقادیر (الف) انرژی جنبشی، (ب) انرژی پتانسیل، و (ج) انرژی کل، بار خردکننده آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان با پانزده توزیع مختلف از اندازه خردکننده ----- ۵۶

فهرست جداول

- جدول ۲-۱- خلاصه تحقیقات انجام شده درباره شبیه سازی آسیاهای گلوله ای به روش اجزای گسسته ----- ۲۷
- جدول ۳-۱: ابعاد آسیای گلوله ای صنعتی شرکت آسفالت طوس سنگان ----- ۳۹
- جدول ۳-۲: توزیع اندازه گلوله های استفاده شده در شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان ۴۰
- جدول ۳-۳: پارامترهای استفاده شده برای شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای مقیاس صنعتی ----- ۴۱

فصل اول:

کلیات

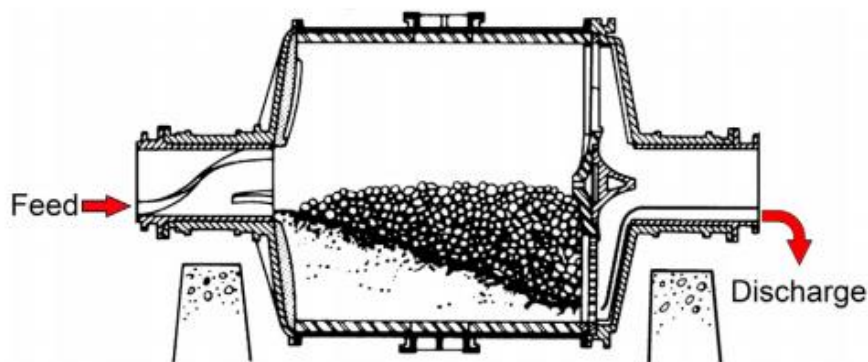
خردایش در صنعت به کاهش اندازه مواد و یا شکستن کانه‌ها به اجزای کوچک‌تر گفته می‌شود. به عبارت دیگر خردایش یک فرآیند فیزیکی- مکانیکی است که در آن مواد بالاتر از محدوده الاستیک کشیده یا فشرده می‌شوند. حدود ۵۵ تا ۷۵ درصد از هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ۳۰ تا ۶۰ درصد از هزینه‌های جاری سالانه صرف عملیات خردایش می‌شود. رساندن ذرات به درجه آزادی مناسب از مهمترین وظایف مهندسان فرآوری مواد معدنی در کارخانه‌های مربوطه می‌باشد و از اهمیت بالایی برخوردار است. این امر توسط چندین مرحله سنک‌شکنی و آسیاکنی صورت می‌پذیرد [۱].

برای دستیابی به حداکثر کارایی مدار خردایش، ظرفیت آسیا باید حداکثر باشد و این در حالی است که هزینه‌های عملیاتی باید کمترین مقدار باشند. در بهینه‌سازی فرآیند خردایش علاوه بر دستیابی به درجه آزادی مناسب برای جدایش کانی‌ها، باید توجه داشت که از خردایش کم و یا خردایش بیش از حد جلوگیری شود. بهینه‌سازی ظرفیت و هزینه‌های عملیاتی نیازمند یافتن روند توان‌کشی در فرآیند خردایش است. به علاوه اندازه-گیری‌های پیوسته توزیع دانه‌بندی و اطلاعات نوع کانه در بهینه‌سازی فرآیند خردایش مؤثر است [۲].

۱-۲- آسیای گلوله‌ای

خردایش بیشتر ذرات محصول آسیاهای (خودشکن و نیمه‌خودشکن) برای رسیدن به درجه آزادی مطلوب قبل از انجام فرآیند پریارسازی معمولاً در آسیاهای گلوله‌ای انجام می‌گیرد (شکل ۱-۱). از این آسیاها برای خردایش مجدد ذرات در مدارهای پریارسازی نیز استفاده می‌شود. در آسیاهای گلوله‌ای نسبت طول به قطر کمتر از ۲/۵ است. بار خردکننده این آسیاها را گلوله‌های فولادی تشکیل داده که در حدود ۵۰٪-۴۰ حجم داخلی آسیا را به خود اختصاص می‌دهند. آسیاهای گلوله‌ای در صنعت معمولاً بصورت مدار بسته با کلاسیفایرها (هیدروسیکلون‌ها) استفاده می‌شوند. سرعت آسیاهای گلوله‌ای ۷۰-۸۰٪ سرعت بحرانی بوده و این آسیاها با درصد

جامد پالپ ۸۰-۶۵٪ کار می‌کنند. در آسیاهای گلوله‌ای صنعتی معمولاً از تلفیقی از گلوله‌های ریز (۵-۲ cm) و درشت (۱۰-۵ cm) استفاده می‌شود. گلوله‌های درشت برای خردایش ذرات درشت و گلوله‌های ریز برای خردایش ذرات ریز به کار گرفته می‌شوند [۱].



شکل ۱-۱: تصویری از یک آسیای گلوله‌ای [۱]

۱-۳- پارامترهای موثر بر کارایی آسیاهای گلوله‌ای

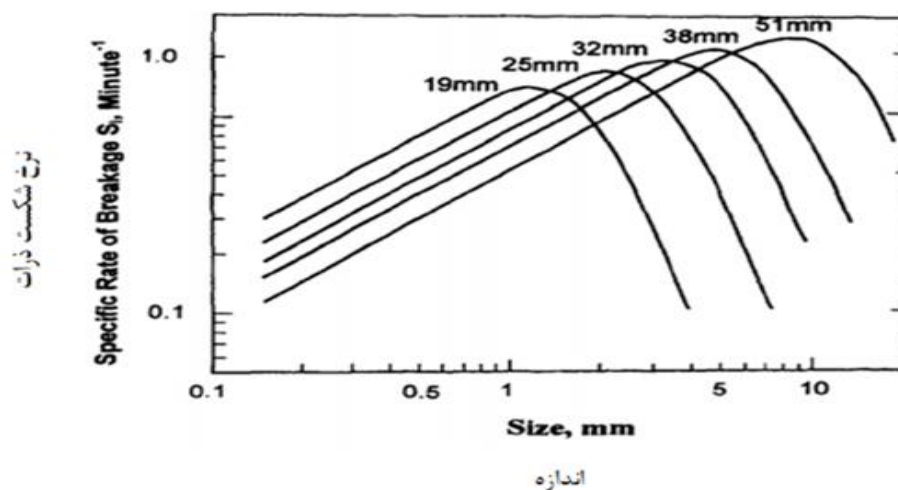
مهمترین پارامترهای عملیاتی موثر بر کارایی آسیاهای گلوله‌ای شامل ابعاد و مقدار گلوله شارژ شده به داخل آسیا، سرعت آسیا و درصد جامد پالپ داخل آسیا می‌باشند.

۱-۳-۱- ابعاد و مقدار گلوله شارژ شده به داخل آسیای گلوله‌ای

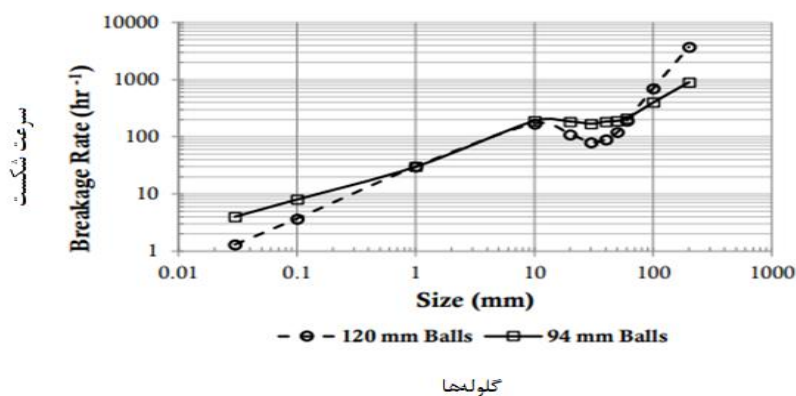
هر گلوله در هر چرخش آسیا فقط می‌تواند یک ضربه وارد سازد. تعداد گلوله‌های بزرگتر در واحد حجم آسیا نیز نسبت به گلوله‌های کوچکتر کمتر است که در نتیجه تعادلی بین انرژی خردایشی گلوله‌های بزرگتر و تعداد ضربه ایجاد شده توسط آنها در هر گردش آسیا ایجاد می‌گردد. انتخاب ابعاد گلوله‌ها در ارتباط مستقیم با سختی

ماده معدنی و توزیع دانه‌بندی خوراک ورودی به آسیا می‌باشد که در این میان مواد معدنی نرم‌تر و ریزتر نسبت به مواد معدنی سخت‌تر به گلوله‌های کوچک‌تری احتیاج دارند [۳].

میزان گلوله شارژشده به داخل آسیاهای گلوله‌ای بدون شک یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر نرخ خردایش ذرات در آسیا، ابعاد محصول تولیدی و همچنین بار در گردش مدار خردایش است. بررسی‌ها نشان می‌دهند نرخ خردایش ذرات درشت با افزایش ابعاد گلوله‌ها و نرخ خردایش ذرات ریز با کاهش ابعاد گلوله‌ها افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر احتمال خردایش ذرات درشت در حضور گلوله‌های بزرگ‌تر و احتمال خردایش ذرات ریز در حضور گلوله‌های کوچک‌تر افزایش می‌یابد [۳].



شکل ۱-۲: ارتباط تابع انتخاب (نرخ شکست ذرات) با ابعاد ذرات و ابعاد گلوله‌ها در آسیا [۳]

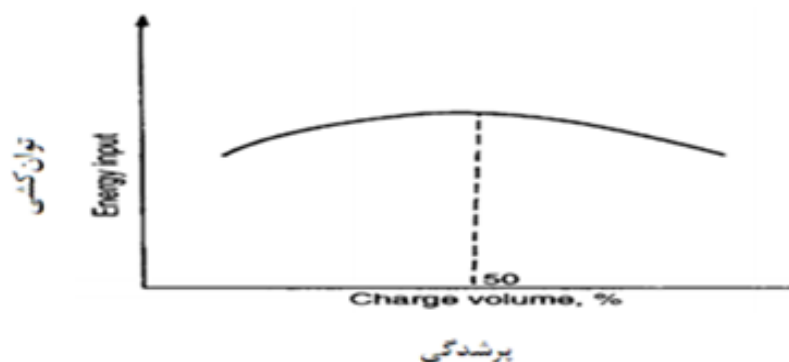


شکل ۱-۳: تاثیر ابعاد گلوله بر آهنگ خردایش [۴]

گلوله‌های فلزی با وجود توانایی در خرد کردن سریع‌تر سنگ‌های درشت‌تر، به طور مؤثر، مقدار واسطه خردایش سنگی را کاهش داده و در نتیجه مقدار ذرات دانه‌ریز تولیدشده در محصول را کاهش می‌دهند. این مسئله به دو صورت بر عملیات تأثیر می‌گذارد. اول اینکه تمایل بیشتری به خرد کردن ضربه‌ای نسبت به خرد کردن سایشی پیدا می‌شود. ثانیاً با خرد شدن سریع‌تر واسطه خردایش، زمان ماند آن‌ها نیز در آسیا کاهش یافته و کمتر تحت سایش قرار می‌گیرند و در نتیجه ذرات ریز کمتری تولید می‌شود. ذرات با ابعاد (۲۵-۵۰ mm) نیز توسط گلوله‌های اضافه‌شده کاهش ابعاد می‌یابند. به عنوان یک قانون کلی، استفاده از واسطه خردایش کوچک‌تر، منجر به تولید ذرات ریزتر می‌شود. بنابراین حذف ذرات با ابعاد بحرانی باعث کاهش توانایی آسیا در خرد کردن ذرات ریزتر می‌گردد. فقط با افزایش حجم بار گلوله تا مقادیر زیاد به طور مثال (بیش از ۱۵٪ حجم آسیا) می‌توان این تأثیر منفی را کاهش داد. در این مورد تعداد گلوله‌ها به قدری زیاد است که مقادیر زیادی از واسطه خردایش خرد می‌گردد و گلوله‌ها جایگزین آنها می‌شوند. این تأثیر را می‌توان در توزیع آهنگ خردایش با استفاده از ابعاد مختلف گلوله‌ها، نشان داد (شکل ۱-۲). این منحنی افزایش نرخ شکست در ذرات درشت و کاهش نرخ شکست در ذرات ریز را در صورت افزایش ابعاد گلوله‌های اضافه‌شده، نشان می‌دهند [۴]. در صورت استفاده از گلوله‌های با ابعاد بسیار بزرگ، مصرف گلوله بالا رفته، کاهش آهنگ خردایش در ذرات ریز و در نهایت کاهش راندمان خردایش را

به همراه خواهد داشت. کوچک بودن بیش از حد گلوله‌ها نیز باعث کاهش آهنگ خردایش ذرات درشت و افزایش نرمه می‌شود. بدین علت هم باید ابعاد بهینه گلوله جهت رسیدن به بالاترین راندمان کاری عملیات خردایش تعیین گردد. افزایش میزان گلوله شارژشده به داخل آسیا باعث افزایش نرخ خردایش ذرات و در نتیجه ریزتر شدن ابعاد محصول می‌گردد [۴].

در محل ریزش بار و گلوله (پاشنه) در آسیاهای گلوله‌ای، سهم مکانیزم ضربه از سایش بیشتر است که این امر موجب درشت‌تر شدن محصول می‌گردد. اما با افزایش پرشدگی، سهم مکانیزم سایش نیز به علت تشکیل پاشنه و سرخوردن بیشتر گلوله‌ها روی بار زیادتر شده که این امر باعث ریزتر شدن محصول می‌گردد. همچنین میزان پرشدگی بالا باعث افزایش ضربات در واحد حجم شده و مانع خروج سریع پالپ در طول آسیا می‌شود. با کاهش پرشدگی آسیا، استخر پالپ در آن تشکیل می‌شود. وجود استخر پالپ باعث کم شدن نیروی برخورد به بار شده و در نتیجه مانع شکست ذرات می‌شود. از طرف دیگر مکانیزم سایش ذرات نیز در بخش آبشاری کوچک کاهش می‌یابد [۴].



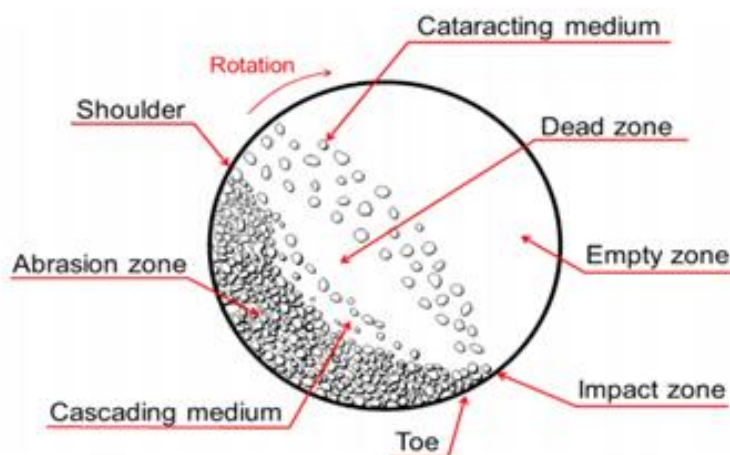
شکل ۴-۱: تغییرات توان کنی آسیا گلوله‌ای با تغییر پرشدگی آن با گلوله [۱]

نتایج پژوهش در کارخانه فرآوری طلای Kinross Paracatu در برزیل با هدف بهینه‌سازی مدار خردایش شامل آسیای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای نشان داد که کاهش ابعاد گلوله‌های شارژ شده به داخل آسیای گلوله‌ای از ۳ اینچ

به ۲/۵ اینچ و افزایش مقدار گلوله شارژشده به داخل آسیا از ۲۸٪ به ۳۳٪ باعث کاهش ابعاد ذرات محصول مدار خردایش و افزایش بازیابی طلا در مدار پرعیارسازی گردید [۴].

۱-۳-۲- سرعت آسیا

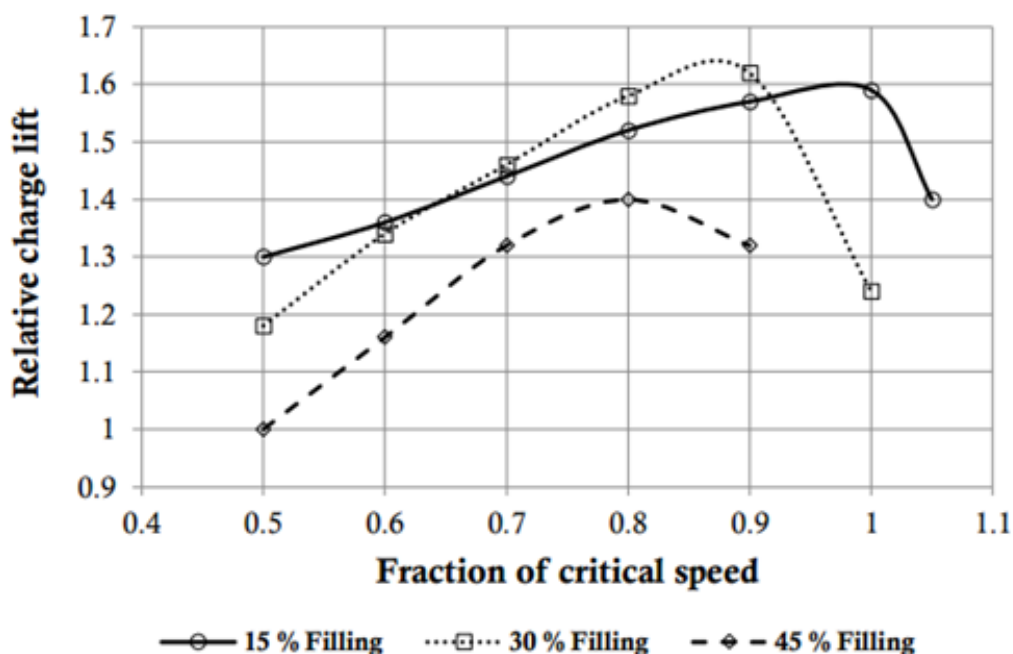
سرعت آسیا (که معمولاً به صورت درصدی از سرعت بحرانی گزارش می‌گردد) از جمله پارامترهای موثر بر نرخ خردایش ذرات، ماندگی پالپ و ظرفیت آسیا است. در سرعت‌های چرخش کم آسیا و یا صاف بودن لاینرها، حرکت بار خردکننده به صورت آبشاری کوچک بوده و مکانیزم عمده خردایش ذرات در این شرایط سایش است. در سرعت‌های نرمال چرخش آسیا، مکانیزم خردایش حرکت بار خردکننده به صورت آبشاری بزرگ بوده و مکانیزم عمده خردایش ذرات در این شرایط ضربه است. در سرعت‌های زیاد چرخش آسیا، بار خردکننده بصورت چسبیده به جداره آسیا می‌چرخد. این وضعیت مطلوب نبوده و خردایشی انجام نمی‌گیرد [۱]. معمولاً سرعت چرخش آسیاهای صنعتی در محدوده ۸۰-۶۰٪ سرعت بحرانی است. شکل (۱-۵) شماتیکی از نحوه حرکت بار داخل آسیا و نواحی مختلف خردایش بسته به سرعت آسیا را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵: نحوه حرکت بار داخل آسیا و نواحی مختلف خردایش بسته به سرعت آسیا [۱]

مقدار بالا بردن مواد در ارتباط با شعاع آسیا بیان می‌شود و سرعتی که در آن بیشترین ارتفاع بالابر اتفاق می‌افتد تابعی از میزان پرشدگی آسیا، نوع و ارتفاع بالابرها می‌باشد. به این علت، بیشترین انرژی پتانسیل در بیشترین ارتفاع بالا برده شده ایجاد می‌گردد، اگر چه کل مقدار شکست تغییری نمی‌کند اما انتظار می‌رود که بیشترین انرژی خرد شدن ضربه‌ای نیز در این نقطه اتفاق بیفتد. در عمل، افزایش سرعت باعث افزایش خردشدگی ضربه‌ای می‌شود که این مورد معمولاً با افزایش خرد کردن ذرات درشت اتفاق می‌افتد که به ظرفیت‌های بالاتر نیز منتهی می‌گردد [۵].

بر طبق نتایج ارائه شده، سرعت بهینه آسیا (که بصورت کسری از سرعت بحرانی تعریف می‌شود) به منظور رسیدن به حداکثر ارتفاع بالابری بار تابع میزان پرشدگی است بطوری که با افزایش درجه پرشدگی مقدار سرعت بهینه آسیا کاهش می‌یابد [۵].



شکل ۶-۱: ارتباط بیشترین ارتفاع سقوط با سرعت و درجه پرشدگی آسیا [۵]

۱-۳-۳- درصد جامد پالپ داخل آسیا

درصد جامد و ویسکوزیته پالپ از جمله پارامترهای موثر بر نرخ خردایش ذرات و همچنین نرخ انتقال ذرات از آسیا می‌باشد. نتایج تحقیقات انجام شده در آسیاهای گلوله‌ای نشان داده است که افزایش بیش از اندازه رقت پالپ باعث افزایش احتمال برخورد گلوله-گلوله، افزایش نرخ سایش لاینر و گلوله‌ها، درشتی محصول و کاهش توان‌کشی آسیا می‌گردد. غلظت بیش از اندازه پالپ داخل آسیا نیز باعث افزایش گرانروی پالپ، کاهش احتمال برخورد گلوله-ذره و در نتیجه درشتی محصول آسیا می‌گردد [۱ و ۳-۵].

کاهش درصد جامد باعث ایجاد استخر پالپ، تماس گلوله با گلوله و در نتیجه افزایش مصرف گلوله می‌شود. دانسیته پالپ خوراک باید تا آنجا که امکان دارد بالا باشد اما با جریان یافتن پالپ در طول آسیا سازگار باشد و معمولاً گلوله‌ها باید با لایه‌ای از کانه پوشیده شوند. آب باعث حرکت رو به جلوی مواد داخل آسیا می‌شود و از استخر پالپ می‌شود. در نتیجه این پدیده به علت پایین بودن سرعت برخورد بار خردکننده به بار خرد شونده، فرآیند خردایش مختل شده و سبب ازدیاد بار داخل آسیا می‌شود [۵].

ویسکوزیته با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد، بنابراین در مواردی که خردایش بسیار ریز نیاز است، درصد جامد باید کمتر در نظر گرفته شود. در آسیاکنی تر با اضافه شدن آب تا درصد جامد وزنی ۸۰-۶۰٪ بسته به نوع مواد حرکت مواد در طول آسیا بهتر می‌شود. در این بازه از درصد جامد براساس نوع مواد، مقدار بهینه‌ای وجود دارد که افزایش کارایی آسیاکنی را به همراه دارد. دانسیته پالپ بر حرکت مواد در طول آسیا و عملکرد طبقه-بندی‌کننده تأثیر می‌گذارد. گرچه به طور صریح نمی‌توان اظهار داشت، اما دانسیته پالپ بر توزیع انرژی‌های برخورد ذرات نیز مؤثر است. ویسکوزیته بالای پالپ مانع از حرکت گلوله‌ها می‌شود اما به ذرات اجازه می‌دهد به سطح گلوله‌ها بچسبند، در حالی که پالپ رقیق باعث شسته شدن ذرات از سطح گلوله‌ها می‌شود و احتمال گیر افتادن ذرات در بین گلوله‌ها را کاهش می‌دهد. درصد جامد بر انرژی مورد نیاز به منظور خردایش و توزیع زمان ماند بار داخل آسیا و همچنین بر روی مکانیزم خردایش نیز تأثیر دارد [۶ و ۷].

۱-۳-۴- شکل روزنه خروجی آسیا

شکل روزنه‌ها (شکافی، مربعی یا دایره‌ای)، ابعاد روزنه‌های شبکه که معمولاً (۴۰-۱۰ mm) است. بررسی‌ها نشان داده است که سطح باز شبکه‌ها نباید از ۱۰٪ بیشتر باشد. سایش تدریجی شکاف‌ها باعث درشت شدن محصول آسیا بدلیل خروج ذرات درشت‌تر، افزایش نرخ بار در گردش آسیا و همچنین افزایش احتمال پس‌زنی پالپ به داخل آسیا می‌گردد. بنابراین با اندازه‌گیری پیوسته ابعاد روزنه‌ها و تعویض به موقع آنها در صورت سایش (بیش از حد مطلوب) می‌توان از پیامدهای فوق جلوگیری نمود [۸].

۱-۴- هدف از انجام تحقیق

هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آسیای گلوله‌ای کارخانه فرآوری شرکت آسفالت طوس سنگان می‌باشد. با توجه به نقش کلیدی آسیای گلوله‌ای در مدار خردایش در راندمان کلی فرآیند، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آن از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

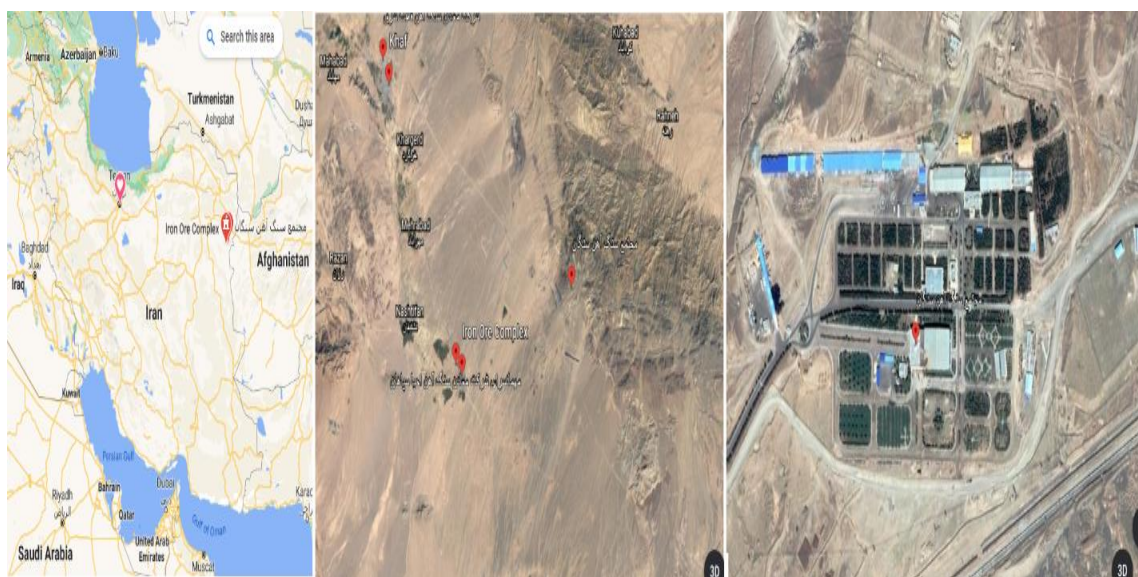
۱-۵- ضرورت انجام تحقیق

با انجام شبیه‌سازی دقیق، می‌توان تأثیر توزیع اندازه و نوع گلوله بر مکانیزم خردایش آسیاهای گلوله‌ای بررسی نموده و بدین ترتیب بهترین شرایط عملیاتی به منظور رسیدن به حداکثر کارایی متالوژیکی در کوتاه‌ترین زمان تعیین می‌گردد.

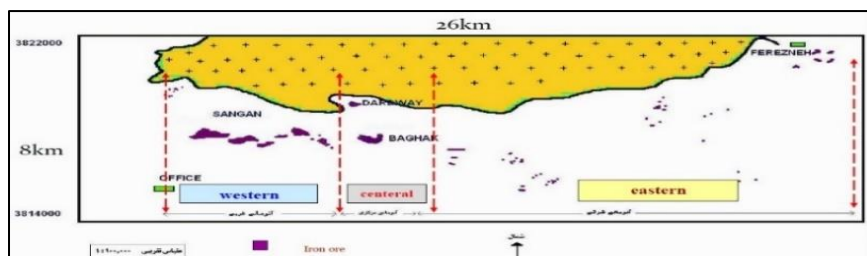
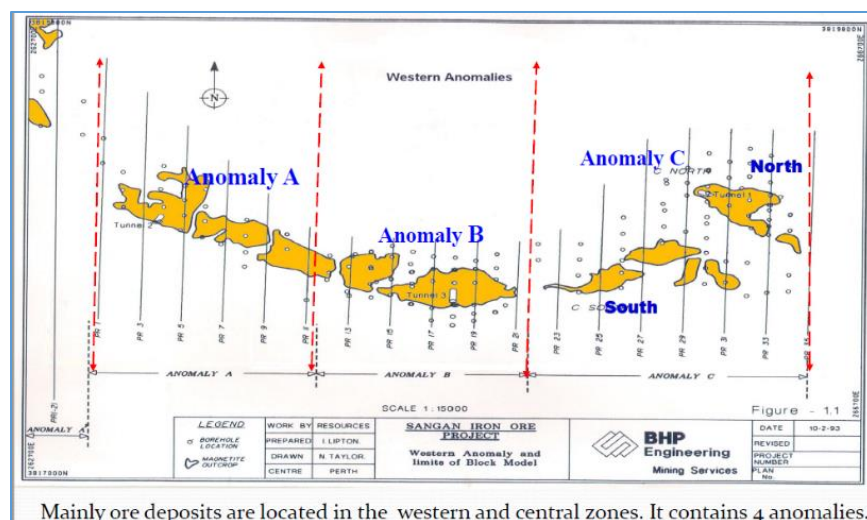
۱-۶- معرفی کانسارهای سنگ آهن سنگان خواف و شرایط جغرافیایی آن

مجموعه کانسارهای سنگ آهن سنگان در فاصله حدود ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد ۶۸ کیلومتری جنوب-غربی تایباد، ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی خواف و ۱۸ کیلومتری شمال شرقی سنگان در استان خراسان رضوی و نزدیک مرز افغانستان قرار دارد. محدوده در برگیرنده این مجموعه کانساری به شکل مستطیلی به طول تقریبی ۲۲ کیلومتر و عرض ۱۰ کیلومتر می‌باشد که شامل کانسارهای غربی (تپه قرمز، A، B، C شمالی، C جنوبی) کانسارهای مرکزی (باغک و دردوی) و کانسارهای شرقی (فرزنه، معدن جو، سم آهنی) می‌باشد.

حداکثر ارتفاع منطقه ۱۸۱۲ متر می‌باشد. این منطقه دارای آب و هوای کویری خشک و با متوسط بارندگی سالیانه ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر در سال همراه با وزش بادهای تقریباً دائمی است که در ۶ ماهه‌ی اول سال سرعت آن به بیش از ۵۰ کیلومتر در ساعت می‌رسد. حداکثر درجه‌ی حرارت ۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و حداقل آن ۱۱- درجه‌ی سانتی‌گراد ثبت شده است [۹]. دسترسی به محل کانسارهای سنگ آهن سنگان از دو مسیر آسفalte مشهد، تربت حیدریه، خواف، سنگان، مشهد، فریمان، تربت‌جام، تایباد و سنگان امکان‌پذیر می‌باشد.



شکل ۱-۷: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه اکتشافی (بدون مقیاس) [۹]



شکل ۱-۸: موقعیت آنومالی‌های معدن سنگان [۹]

۷-۱- معرفی کارخانه فرآوری شرکت آسفالت طوس سنگان خواف

شرکت آسفالت طوس پیمان کار شرکت صنعتی و معدنی توسعه ملی با ظرفیت ۲/۵ میلیون تن در سال، کنسانتره تولید می‌کند. کنترل و افزایش عیار آهن موجود در سنگ، یکپارچگی ساختار ظاهری و داخلی سنگ از دلایل فرآوری سنگ آهن می‌باشد.

اولین مرحله در چرخه تولید کنسانتره با ورود سنگ آهن به سنگ‌شکن آغاز می‌شود، سپس مواد معدنی خردایش‌شده توسط نوار نقاله به ناحیه بلندینگ^۱ کارخانه منتقل شده و مرحله انباشت و برداشت توسط استکر^۲ و ریکلایمر^۳ انجام و خوراک‌دهی به خط تولید شروع می‌شود. با توجه به طراحی کارخانه در ابتدای خط ورودی خوراک، یک سرنده با سایز ورودی ۵۰-۰ میلی‌متر قرار دارد که سنگ آهن با ابعاد بیشتر از سایز ذکر شده به عنوان

^۱ Blending

^۲ staker

^۳ reclimer

سرریز از سرند خارج و جهت خردایش مجدد به واحدهای سنگ شکنی منتقل می گردد. سنگ آهن در ادامه چرخه تولید وارد آسیاکنی خشک (HPGR) می گردد. در حال حاضر در کارخانه های فرآوری سنگ آهن، از این تجهیز برای تامین دو هدف عمده استفاده می گردد، پیش از مدار آسیاکنی با هدف پیش نرم کنی مواد سنگ شکنی شده و در انتهای مدار فرآوری، با هدف افزایش عدد بلین^۴ کنسانتره جهت تامین خوراک مطلوب کارخانه گندله سازی، محصول خروجی آسیای غلتکی فشار بالا وارد سرند ۶ - ۰ میلیمتری سالن تولید می گردد [۹].

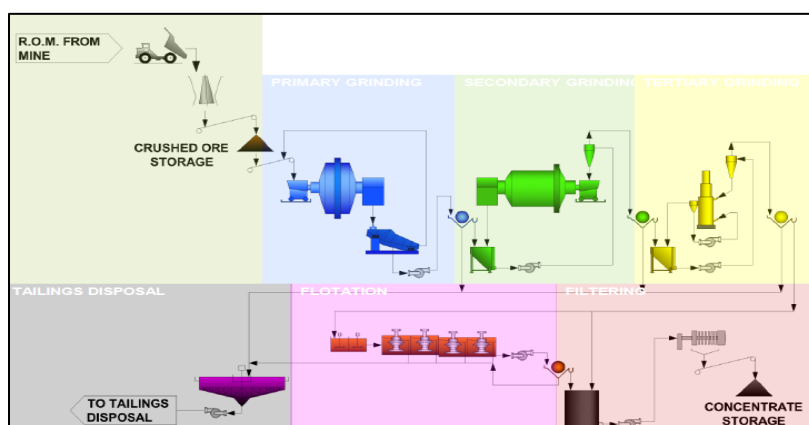
شایان ذکر است با افزودن آب در این قسمت فرایندها به صورت تر انجام می گردد. اسلاری^۵ خروجی سرند در ابتدا به منظور جداسازی به روش گریز از مرکز ذرات و براساس دانه بندی ریز یا درشت وارد هیدروسیکلون اولیه شده و ذرات کوچک به عنوان سرریز و ذرات درشت به عنوان ته ریز خارج می گردند. ذرات درشت در ادامه چرخه تولید به منظور خردایش وارد آسیای گلوله ای اولیه می گردد. ذرات پس از عبور از مرحله آسیاکنی به ابعاد بسیار ریز مورد نظر رسیده اند و لازم است به منظور جدا کردن مواد با ارزش به اولین ناحیه جدایش مغناطیسی هدایت شوند. جداکننده های مغناطیسی تر، عموماً جداکننده های نوع درام^۶ هستند و اسلاری از روی این درام ها که دارای خاصیت مغناطیسی می باشد عبور داده می شود. کانی های آهن دار به درام می چسبند و در انتهای درام توسط یک تیغه از روی درام جمع آوری می شوند. سایر کانی های موجود در دوغاب نیز از ته ریز تجهیز خارج و به حوضچه تیکنر انتقال یافته و کانی های آهن دار حاصله مجدداً جهت ادامه چرخه فرآیندی وارد هیدروسیکلون اولیه می شوند. ذرات ریز که به صورت سرریز از هیدروسیکلون اولیه خارج شده، وارد هیدروسیکلون ثانویه می گردند. مجدداً براساس اندازه، خروجی هیدروسیکلون شامل ذرات درشت تر به صورت ته ریز (وارد آسیای گلوله ای ثانویه شده و خردایش مجدد انجام شده و محصول مجدداً وارد هیدروسیکلون ثانویه می گردد) و ذرات ریز به صورت سرریز به منظور جدا کردن مواد با ارزش به ناحیه جدایش مغناطیسی هدایت می شوند. کانی های آهن دار به درام می چسبند

⁴ Blaine

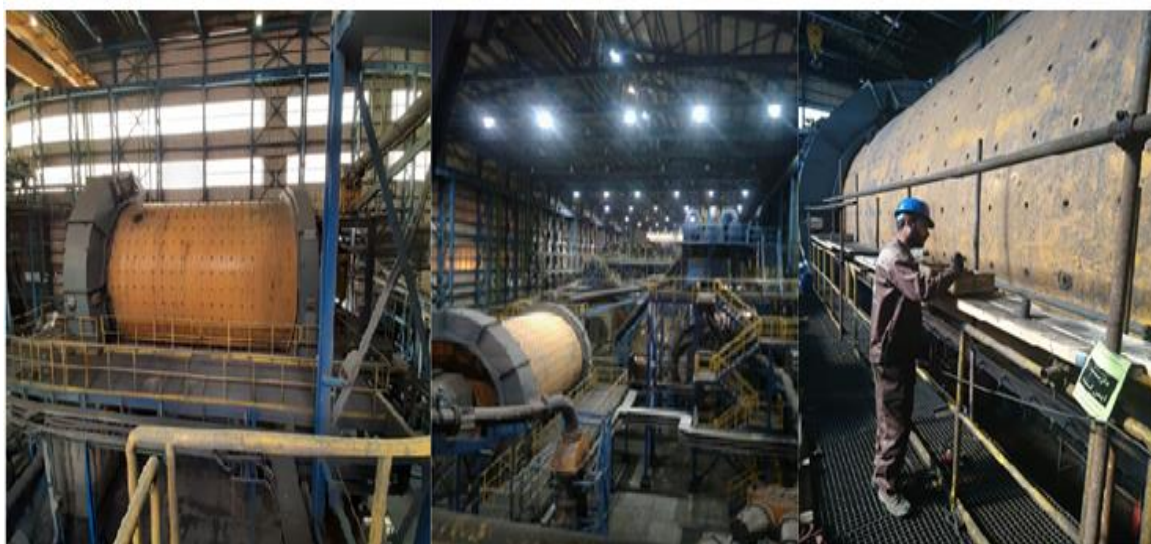
⁵ slurry

⁶ Drum

و سایر کانی‌های موجود در دوغاب نیز از ته‌ریز تجهیز خارج و به حوضچه تیکنر انتقال می‌یابد. کانی‌های آهن‌دار حاصله مجدداً جهت ادامه چرخه فرآیندی به منظور حذف عناصر مزاحم مانند گوگرد وارد سیستم فلوئتاسیون می‌شود. در این مرحله گوگرد پس از عبور از سلول‌های فلوئتاسیون با اضافه نمودن مواد شیمیایی حذف می‌شود. در ادامه چرخه تولید، دوغاب حاصله به ناحیه جدایش مغناطیسی نهایی وارد می‌شود. کانی‌های آهن‌دار به درام می‌چسبند و به ناحیه فیلتراسیون منتقل می‌شوند. سایر کانی‌های موجود در دوغاب نیز از ته‌ریز تجهیز خارج و به دلیل دارا بودن مقدار قابل توجه آهن جهت جداسازی به ناحیه رافر انتقال می‌یابد. دوغاب حاصله حاوی مقادیر زیادی آب است که باید آبگیری و خشک گردد و رطوبت آن به ۹-۱۰ درصد برسد. بدین منظور از فیلترهایی که به صورت دیسک فیلتر با صفحات سرامیکی، برای خشک کردن کنسانتره بدست آمده، استفاده می‌شود. سپس کنسانتره آب‌گیری شده به انبار محصول منتقل و در آنجا دپو می‌گردد. سایر کانی‌های موجود در سنگ آهن که به صورت باطله به حوضچه تیکنر هدایت شده‌اند توسط فلوکولانت ته‌نشین می‌شوند. سرریز آب حاصله وارد چرخه تولید و ذرات جامد ته‌نشین شده به سمت سد باطله هدایت می‌شود. شایان ذکر است بر اساس طراحی کارخانه درصد عیار سنگ آهن در خوراک ورودی کارخانه ۴۲ درصد بوده که عیار کنسانتره خروجی باید ۶۷/۵ درصد می‌باشد که در حال حاضر عیار کنسانتره خروجی بیشتر از ۶۹ درصد می‌باشد [۹].



شکل ۹-۱: فلو شیت کارخانه پرعیارکنی آسفالت طوس سنگان خواف [۹]



شکل ۱-۱۰: تصاویر جهات مختلف از آسیای گلوله‌ای کارخانه فرآوری شرکت آسفالت طوس سنگان



شکل ۱-۱۱: تصویر قسمت ترانیون خوراک آسیای گلوله‌ای

۸-۱- روش اجزای گسسته (DEM)

با توجه به زمان‌بر و پرهزینه بودن تست‌های آزمایشگاهی و صنعتی مربوط به واحدهای فرآوری مواد معدنی از جمله واحدهای خردایش (مانند سنگ‌شکنی و آسیاکنی)، سرندکنی و ذخیره‌سازی مواد (مانند سیلوها)، امروزه روش‌های مدل‌سازی و بویژه مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری به عنوان ابزارهای کمکی و تکمیلی به محققان کمک می‌کنند تا بهترین گزینه‌ها را برای تست‌های مذکور انتخاب کنند. به عبارت دیگر نمی‌توان تنها با استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی کامپیوتری و بدون تست‌های آزمایشگاهی، یک کارخانه یا یک واحد فرآوری مواد معدنی را طراحی کرد. روش اجزای گسسته نیز یکی از این روش‌های مدل‌سازی عددی است که همراه با تست‌های آزمایشگاهی و پیلوت می‌تواند به مهندسان فرآوری مواد معدنی کمک کند تا بهترین گزینه‌ها را برای طراحی واحدهای فرآوری مواد معدنی و بویژه واحدهای خردایش و طبقه‌بندی انتخاب کنند [۱۰]. روش‌های عددی به احتمال فراوان قوی‌ترین روش برای مدل‌سازی مجموعه کره‌ها و دیسک‌ها می‌باشند. در مدل‌سازی عددی به سبب آنکه داده‌ها در هر مرحله از آزمون در دسترس هستند، نسبت به مدل‌سازی‌های تحلیلی در زمینه کاربردی و مدل‌سازی‌های فیزیکی انعطاف‌پذیری بیشتری وجود دارد. از موارد انعطاف‌پذیری مدل‌سازی عددی می‌توان به زمینه‌هایی مانند انواع بارگذاری، ابعاد مختلف ذرات، توزیع‌های متنوع دانه‌بندی و ویژگی‌های مختلف فیزیکی ذرات اشاره کرد [۱۰].

در دهه ۱۹۸۰ مانع اصلی در حل معادلات این بود که تنها تعداد اندکی از ذرات توسط کامپیوترهای آن دوره می‌توانستند مورد بررسی قرار گیرند. از سوی دیگر محاسبات بسیار زمان‌بر بودند به سبب آن که ماتریس بیان‌کننده سختی‌های برخورد ذرات پس از ایجاد یا شکسته شدن برخورد باید از نو فرمول‌بندی می‌شد [۱۱]. اما امروزه با ظهور ابررایانه‌ها این مانع به طور کامل از بین رفته است، به طوری که کامپیوترهای امروزی قادرند تا میلیاردها ذره را شبیه‌سازی کنند. روش اجزای گسسته^۷ روشی مناسب برای مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی جریان ذرات در این واحدها است. با استفاده از این روش، شبیه‌سازی واحدهای فرآوری مواد معدنی بویژه واحدهای خردایش و

^۷- Discrete Element method

طبقه‌بندی امکان‌پذیر است. با استفاده از این روش، پیش‌بینی الگوی حرکت ذرات، مقدار توان مصرفی، و انرژی جنبشی آسیاهای آزمایشگاهی و صنعتی مانند آسیاهای گلوله‌ای و نیمه خودشکن، و نیز بررسی عملکرد سرندهای آزمایشگاهی و صنعتی و شبیه‌سازی عملیات سرنده‌کنی آنها امکان‌پذیر است [۱۲].

فصل دوم:

مروری بر کارهای گذشته

امروزه شبیه‌سازی به ابزاری رایج در طراحی و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی تبدیل شده است [۱۳ و ۱۴]. افزایش پیوسته در توان محاسباتی محققان را قادر می‌سازد که روش‌های عددی را پیاده‌سازی کنند که بر توده دانه‌ای به عنوان یک ذات تمرکز نمی‌کنند، اما ویژگی‌های کلی آن را از طریق مشاهده رفتار تک‌تک ذرات استنتاج می‌کنند [۱۵]. بخاطر ذات بسیار ناپیوسته واسطه‌های دانه‌ای شخص باید انتظار داشته باشد که آنها مستلزم یک روش شبیه‌سازی ناپیوسته باشند. در واقع تا امروز روش اجزای گسسته (راگ) رویکرد پیش‌رو برای مسائل این‌گونه می‌باشد. بخاطر مزایای ذاتی آن در تحلیل مواد دانه‌ای، راگ به سرعت در دهه‌های اخیر توسعه یافته است و بطور گسترده‌ای در مهندسی فرآوری مواد معدنی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶].

در صنعت فرآوری مواد معدنی می‌توان حدود ۷۰٪ توان مصرفی در فرآیندهای آسیاکنی را کاهش داد اگر این توان به حداقل عملی آن برسد [۱۷]. با این اوصاف بدست آوردن آسیاکنی پربازده‌تر در آسیاهای گلوله‌ای مسئله‌ای مهم است، از آنجایی که آن‌ها نرخ بازدهی پایینی دارند که تا حدی ناشی از کمبود ایجاد حرکات آبشاری کوچک و بزرگ برای گلوله‌ها و نقاط شانه و پاشنه‌ی نامناسب می‌باشد [۱۸]. برای یک مقدار مشخص از گلوله‌ها اگر سرعت چرخش آسیا بالاتر یا مساوی با سرعت بحرانی آن باشد، گلوله‌ها به جداره‌ی آسیا می‌چسبند و عملیات آسیاکنی رخ نمی‌دهد و حرکتهای گریز از مرکز رخ می‌دهند. از طرف دیگر، اگر سرعت چرخش آسیا بین ۸۰٪ و ۱۰۰٪ سرعت بحرانی آن باشد، نقاط شانه و پاشنه‌ی مناسب ایجاد نمی‌شوند و انرژی آسیاکنی برای ضربه‌زدن گلوله‌ها به جداره آسیا مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این حالت حرکتهای گریز از مرکز نیز ممکن است ایجاد شوند. با وجود این، اگر سرعت آسیا بین ۶۰ و ۸۰٪ سرعت بحرانی آن باشد، نقاط شانه و پاشنه‌ی مناسب و نیز حرکات آبشاری کوچک و بزرگ ایجاد می‌شوند که منجر به آسیاکنی بهتر می‌شود. در این مورد، مکانیزم غالب ضربه خواهد بود که حالت بهینه برای فرآیند می‌باشد و مصرف توان آسیا را کاهش خواهد داد. ضمناً مکانیزم سایش در این حالت چندان مؤثر نیست. در سرعت‌های کمتر از ۶۰٪ سرعت بحرانی، حرکتهای آبشاری کوچک

و بزرگ به تدریج ناپدید می‌شوند و گلوله‌ها روی یکدیگر می‌لغزند و سر می‌خورند. در این مورد آسیاکنی بهینه نیست و مکانیزم سایش نقش مهم‌تری را بازی می‌کند [۱۸]. از میان دیگر فاکتورهای مؤثر بر ایجاد حرکات آبشاری بزرگ و کوچک در آسیاها، می‌توان از لیفترها نام برد. لیفترها سبب می‌شوند گلوله‌ها تا یک ارتفاع بیشتر بالا بروند و از سر خوردن آنها جلوگیری می‌کنند [۱۸].

با توجه به اینکه هدف شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای کارخانه شرکت آسفالت طوس سنگان است، در این فصل خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده تاکنون در زمینه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی این تجهیز ارائه می‌گردد.

۲-۲- شبیه‌سازی‌های انجام شده آسیای گلوله‌ای

در کشورهای دیگر نیز مطالعات فراوانی در خصوص شبیه‌سازی تجهیزات مختلف فرآوری مواد معدنی از جمله آسیای گلوله‌ای به روش اجزای گسسته انجام شده است. تعدادی از مهمترین آن‌ها به صورت زیر می‌باشد:

در سال ۲۰۰۹ حرکت گلوله، با توجه به جداسازی محوری و مصرف انرژی و همچنین توزیع استفاده از انرژی بین بخش‌های مختلف آسیا، در یک کارخانه با استفاده از راگ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۱۹]. رویکرد اجزای گسسته به طور ویژه سودمند است از آنجایی که پیش‌بینی‌ها می‌توانند به آسانی از روی داده‌های شبیه‌سازی انجام شوند که به دست آوردن آن‌ها به طور تجربی دشوار، و احتمالاً گران، خواهد بود. نقطه قوت دیگر مدل‌سازی اجزای گسسته سهولت انجام مطالعات پارامتری برای مطالعه کردن اثرات خواص ذرات، شرایط فرآیند، یا طراحی تجهیزات است. بعلاوه، از آنجایی که راگ یک رویکرد گسسته است، ذرات می‌توانند توزیعی از خواص داشته باشند. بنابراین ذرات درون سیستم می‌توانند برای مثال توزیعی از اندازه‌ها داشته باشند یا حتی می‌توانند خواص مواد متغیر برای مدل کردن ترکیبی از مؤلفه‌های گوناگون داشته باشند [۲۰]. در سال‌های اخیر، افزایش شدید در توان محاسباتی قابل دسترس این امکان را به شبیه‌سازی‌های اجزای گسسته داده است که به ابزاری کارآمد برای کاربردهای صنعتی تبدیل شوند [۲۱]. پیشرفت‌های اخیر در مدل‌سازی اجزای گسسته منجر شده است به این که

این روش تبدیل به ابزار شبیه‌سازی مفیدی شود که می‌تواند اطلاعات مفصلی را در اختیار قرار دهد که به آسانی در طی آزمایش‌ها اندازه‌گیری نمی‌شوند [۲۲]. با بلوغ شبیه‌سازی اجزای گسسته، اکنون اجرا کردن شبیه‌سازی‌هایی با میلیون‌ها ذره با شکل‌های پیچیده و نیروهای چسبنده بین ذرات در زمان‌های مشخص در پردازنده‌های تک (کامپیوترهای رومیزی) دارد ممکن می‌شود [۲۲ و ۲۳]. آسیاهای گلوله‌ای توسط میشر و راماجانی شبیه‌سازی شده‌اند [۲۴]. میشر و راماجانی [۲۴] نخستین کسانی بودن که حرکت بار خردکننده (گلوله‌ها) را در آسیاهای گلوله‌ای با قطر بزرگ با استفاده از شبیه‌سازی راگ شبیه‌سازی کردند. تخلیه قیف بوسیله کلیری و محققان دیگر بررسی شده است. شبیه‌سازی جریان ذرات غیرکروی در قیف‌ها بوسیله تاو انجام شده است [۲۵]. بعدا پاول و مک‌براید [۲۶] حرکت واسطه و نواحی آسیاکنی (هد، شانه خروجی، مرکز چرخش، سطح تعادل، پاشنه توده‌ای و پاشنه ضربه) را به تصویر کشیدند. در سه دهه اخیر، اهمیت توزیع بار خردکننده در ایجاد نقاط شانه و پاشنه مناسب در آسیاهای گردان مورد بحث قرار گرفته است [۲۷ و ۲۸]. کلیری [۲۷ و ۲۸] از راگ برای پیش‌بینی ارتفاع نقاط شانه و پاشنه مناسب در آسیاهای گلوله‌ای استفاده کرد. مرور شبیه‌سازی کامپیوتری آسیاهای گردان به وسیله روش اجزای گسسته به وسیله میشر صورت پذیرفت که در آن کاربردهای عملی راگ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۲۹]. روش‌های گوناگون استخراج داده‌های برخورد از مدل راگ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. روش‌های گوناگون استخراج داده‌های برخورد از مدل راگ و ترجمه آن به تخمین‌های شکست به وسیله موریسون و کلیری مورد بحث قرار گرفته‌اند که در آن مکانیزم‌های گوناگون شکست (ضربه و سایش) و تاریخچه‌های ضربات ویژه ذرات به منظور ارزیابی نرخ‌های شکست برای فراکسیون‌های اندازه‌های گوناگون در آسیاها مورد بررسی قرار گرفتند [۳۰]. عبدالرحمان و همکاران نشان دادند که راگ به نحو موفقیت‌آمیزی مصرف توان را در عملیات‌های کارخانه آسیاهای گردان گوناگون پیش‌بینی می‌کند [۳۱]. تخمین انرژی در آسیاکنی با استفاده از مدل‌سازی راگ به وسیله ویراسکارا و همکاران انجام پذیرفت جایی که آنها محیط شکست در آسیاها را با استفاده از تکنیک‌های راگ و نحوه اینکه چطور این تکنیک‌ها می‌توانند برای ایجاد داده‌های مفیدتر برای آسیا و مدل‌سازی دستگاه خردایش بسط داده شوند، بررسی کردند [۳۲]. بررسی سطح پرشدگی بار، ارتفاع لیفتر، تعداد و نوع لیفتر، و سرعت

آسیا بر توان مصرفی آسیای گلوله‌ای توسط بیان و همکاران انجام شد [۳۳]. آنها برخلاف کارهای قبلی و همه تئوری‌های کلاسیک برای محاسبه‌ی توان مصرفی آسیای گلوله‌ای که تأثیر لیفترها را نادیده می‌گرفتند و فقط بر نرخ چرخش، سطح پرشدگی بار، و نیز اندازه و شکل واسطه‌ی آسیاکنی تمرکز می‌کردند، تأثیر لیفترها را نیز در نظر گرفتند و میزان خطا را کاهش دادند [۳۳].

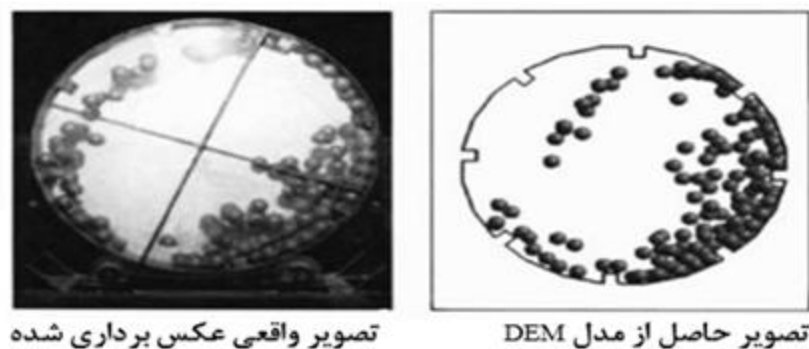
در سال ۲۰۱۱ تحقیقات تجربی و مدل‌سازی حرکت گلوله در آسیاهای گلوله‌ای انجام گرفت. علاوه بر اندازه‌گیری، حرکت گلوله‌ها با استفاده از یک مدل عنصری دیجیتال سه بعدی (DEM) شبیه‌سازی شد که همبستگی نتایج DEM و یافته‌های تجربی بدست آمده در شرایط عملیاتی مختلف، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، که براساس آن توزیع فرکانس انرژی در آسیا محاسبه و در شرایط عملیاتی مختلف مقایسه گردید [۳۴]. همچنین، اخیراً اثر توزیع ذرات بسیار ریز در آسیاهای گلوله‌ای تنها در نظر گرفته شد [۳۵]. بطور کلی در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری روی بحث شبیه‌سازی آسیاها انجام گردید که اهمیت موضوع مورد بررسی را نشان می‌دهد [۳۶]. اعتبارسنجی تجربی کد اجزای گسسته دو بعدی بوسیله آنالیز تصاویر دیجیتال در آسیاهای گردان توسط آلونسو و دلگالیدو انجام شده است [۳۷]. اخیراً روش اجزای گسسته قادر بوده است که برای کاربردهای صنعتی مقیاس بزرگ در هندسه‌های سه بعدی پیچیده مورد استفاده قرار گیرد [۳۸]. فرآیندهای خردایش به وسیله آسیاهای گلوله‌ای، خودشکن و نیمه‌خودشکن توسط کلیری و موریسون مدل شده‌اند [۳۹]. اعتبارسنجی پیش‌بینی‌های روش اجزای گسسته برای آسیاهای نیمه خودشکن (SAG) در آن پژوهش انجام شده است [۳۹]. جدایش‌ها بوسیله سرندها بوسیله کلیری و همکاران مدل شده‌اند [۴۰].

جریان‌های دانه‌ای ذرات بیضوی شکل خشک توسط ووکوئوک و همکاران به صورت سه بعدی به روش اجزای گسسته شبیه‌سازی شده‌اند [۴۱]. همچنین بسیاری از کاربردهای دیگر مدل‌سازی شده‌اند همان‌طور که کاربرد

روش اجزای گسسته از سال ۲۰۰۰ در معرض رشد انفجاری قرار گرفته است [۴۲]. متداول ترین زمینه های استفاده در شناخت الگوهای جریان، کاربرد انرژی و پیش بینی توان مصرفی بوده اند [۴۳].

در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۲، پارامترهای مکانیکی گلوله ها و جداره یک آسیای گلوله ای شفاف که برای شبیه سازی اجزای گسسته مورد نیاز بودند به روش محاسبه معکوس به دست آمدند. روال محاسبه معکوس براساس مقایسه توان الکتریکی مصرفی در آسیای گلوله ای و توان مصرفی محاسبه شده توسط نرم افزار راگ می باشد [۴۴]. در سال های اخیر نیز برخی از مطالعات در مرکز تحقیقات فرآوری کاشی گر (KMPC) توسط تیم شبیه سازی این مرکز انجام شده اند که در ادامه به برخی از آن ها اشاره خواهد شد. در دو مورد از این مطالعات تأثیر گام زمانی بر دقت نتایج محاسبات راگ و شبیه سازی حرکت ذرات به روش اجزای گسسته بررسی شده است [۴۵ و ۴۶]. در مطالعه دیگری الگوریتم هایی برای تشخیص برخورد ذرات در شبیه سازی به روش اجزای گسسته ارائه شده اند [۴۷]. در پژوهش دیگری با ساخت نرم افزاری به نام $KMPC_{DEM}$ حرکت بار در آسیاهای گردان به روش اجزای گسسته توسط این نرم افزار شبیه سازی شده است و از مقایسه نتایج شبیه سازی ها با نتایج تجربی حاصل از آسیای آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی نرم افزار مذکور استفاده شده است [۴۸]. در مطالعه دیگری، تحلیل افزایش زاویه سطح بالابرهای آسترهای آسیاها بوسیله روش اجزای گسسته انجام گرفت. در این مطالعه آسیاهای خودشکن شرکت سنگ آهن گل گهر سیرجان مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین نرم افزار شبیه سازی توسط محققان برنامه نویسی شد و اعتبارسنجی نتایج آن توسط یک آسیای آزمایشگاهی انجام گرفت [۴۹]. دانه بندی بار و شکل حرکت بار درون آسیا از جمله پارامترهای موثر بر عملکرد آسیای گلوله ای می باشند. در آسیاها به خصوص آسیای گلوله ای، خردایش با ترکیبی از نیروی سایشی و نیروی ضربه ای بین گلوله ها و بدنه آسیا صورت می گیرد بهترین عملکرد خردایش زمانی حاصل می شود که تمام گلوله ها به طور یکنواخت در بین شارژ گسترده شده باشند، بطوری که حداکثر تماس بین گلوله ها و ذرات وجود داشته باشد. علاوه بر این سهم ضربه در خردایش بیشتر از سایش می باشد با استفاده از این روش، پیش بینی الگوی حرکت ذرات، مقدار توان مصرفی، و انرژی جنبشی آسیاهای آزمایشگاهی

و صنعتی مانند آسیاهای گلوله‌ای و نیمه خودشکن، و نیز بررسی عملکرد سرندهای آزمایشگاهی و صنعتی و شبیه‌سازی عملیات سرنندگی آنها امکان‌پذیر است. در سال ۲۰۱۶ در تحقیق دیگری برای بررسی شکل حرکت بار آسیا از نرم‌افزار (PFC 3D)^۸ استفاده شده است. برای این منظور و مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، اقدام به ساخت یک آسیای آزمایشگاهی شده است به نحوی که امکان مشاهده و تصویربرداری از داخل آسیا وجود داشته باشد. شکل بار و توان مصرفی در دو مقدار پرشدگی با ترکیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۵۰]. در نهایت، یک مدل آزمایشگاهی، که فرض می‌کند هر برخورد در آسیا، یک بستر تک لایه ذرات را شامل می‌شود، تست گردید و در مقایسه با شبیه‌سازی، یک همبستگی منطقی را نشان داد [۵۱]. با توسعه توان محاسباتی رایانه‌ها، استفاده از روش عددی برای بررسی تاثیر عوامل عملیاتی بر الگوی حرکت بار و شکل آن در داخل آسیاهای گردان توسعه یافت. Rajamani و همکارانش در ادامه تحقیق خود از روش اجزای گسسته سه بعدی (3D-DEM) استفاده کردند که به دلیل در نظر گرفتن برهم‌کنش ذرات داخل آسیا در راستای طول آسیا به واقعیت نزدیک‌تر بود. یک نمونه از تصاویر تولید شده توسط این روش شبیه‌سازی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است [۵۲].



شکل ۱-۲: نمونه‌ای از تصاویر تولیدشده توسط شبیه‌سازی عددی سه بعدی [۵۲]

پس از معرفی روش مدل‌سازی عددی توسط میشر و راماجانی در اغلب تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر با استفاده از روش اجزای گسسته تاثیر طرح آستر بر مسیر حرکت بار و توان‌کشی نیز مورد قرار گرفته است

⁸ Particle Flow Code 3 dimension

[۵۳]. و راماجانی در کار خود تاثیر سه طرح مختلف آستر (دندانه‌ای، موجی و مستطیلی) را بر مسیر حرکت بار و توان کشی بررسی کرد. در شکل ۲-۲ الگوی حرکت بار برای سه طرح مختلف آسیا که توسط روش DEM مدل‌سازی شده، ارائه گردیده است [۵۳].



شکل ۲-۲: مدل‌سازی نحوه حرکت بار در داخل آسیا برای سه طرح مختلف بالابر (الف-دندانه‌ای، ب-موجی، ج-مستطیلی) [۵۳]

هلانگونی و همکارانش با استفاده از یک آسیای آزمایشگاهی که قسمت جلوی آن شفاف بود، قابلیت روش اجزای گسسته را در پیش‌بینی الگوی حرکت بار و توان کشی برای دو طرح مختلف بالابر (مستطیلی و دوزنقه‌ای) در محدوده وسیعی از سرعت دوران آسیا (تا ۲۰۰ درصد سرعت بحرانی) و پرشدگی‌های مختلف (۲۵، ۳۵ و ۴۵ درصد) بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که روش DEM ضمن پیش‌بینی صحیح الگوی حرکت بار در همه شرایط، تخمین درستی از توان کشی آسیا را نیز، در سرعت‌های معمول در عملیات (سرعت‌های کمتر از سرعت بحرانی) بدست می‌دهد [۵۴]. جورجوویچ با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی، تاثیر ارتفاع بالابر را بر رفتار بار و همچنین توان کشی در آسیا بررسی کرد، وی تاثیر سه ارتفاع مختلف بالابر (۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر) را در یک آسیا به قطر ۵ متر مدل‌سازی کرد و نشان داد که استفاده از بالابرهای بلندتر موجب کاهش توان کشی در مقایسه با بالابرهای کوتاه‌تر می‌شود [۵۵]. جورجوویچ و همکارانش در تحقیق دیگری، ضمن اشاره به اهمیت طرح آستر در مدل‌سازی آسیاهای گردان به خصوص آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن، با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی، تاثیر پرشدگی (۷ تا ۲۰ درصد)، تعداد بالابرها (۰ تا ۲۰) و ارتفاع بالابرها (۵ تا ۲۵ سانتی‌متر) را

بر الگوی حرکت بار و توان کشی در آسیاهای خودشکن بررسی کردند، آن‌ها نشان دادند با افزایش تعداد بالابرها تا تعداد مشخصی، توان کشی در آسیا افزایش می‌یابد و بعد از آن تغییری در توان کشی مشاهده نخواهد شد. همچنین نتیجه گرفتند که سهم خردایش به واسطه سایش و ضربه با انرژی کم با افزایش میزان پرشدگی افزایش می‌یابد ضمناً، افزایش سرعت دوران آسیا موجب افزایش توان کشی در بالابره‌های کوتاه‌تر در مقایسه با بالابره‌های بلندتر می‌شود [۵۶]. تاثیر زاویه صفحه‌ی بالابر بر مسیر حرکت بار یک مسئله شناخته شده است. با توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مسیر حرکت بار بر اساس طرح آستر، تغییر زاویه صفحه بالابر و نسبت فاصله به ارتفاع نیز در طراحی آسترها در نظر گرفته شد. با استفاده از شبیه‌سازی عددی DEM مشخص شد که افزایش نسبت فاصله به ارتفاع و زاویه صفحه‌ی بالابر در آسیاهای نیمه‌خودشکن، هر دو در بهبود مسیر حرکت بار و کارایی آسیاکنی موثر است [۵۷].

جدول ۱-۲- خلاصه تحقیقات انجام شده درباره شبیه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای به روش اجزای گسسته

عنوان تحقیق	نام نویسندگان	سال تحقیق	نتایج تحقیق
روش اجزای گسسته برای شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای	Mishra, Rajamani	1999	شناخت الگوهای جریان، کاربرد انرژی و پیش‌بینی توان مصرفی
درک شبیه‌سازی پیشرفته آسیای گلوله‌ای به روش اجزای گسسته	Rodriguez et al.	2001	تست یک مدل آزمایشگاهی و مقایسه آن با شبیه‌سازی، نشان‌دادن یک همبستگی منطقی
مدل سازی جریان‌های دانه‌ای صنعتی بوسیله روش اجزای گسسته: مطالعه موردی سه بعدی و تأثیر شکل ذرات بر تخلیه قیف	Cleary et al.	2003	اخیراً روش اجزای گسسته برای کاربردهای صنعتی مقیاس بزرگ در هندسه‌های سه بعدی پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است.
مروری بر شبیه‌سازی کامپیوتری آسیای گلوله‌ای به روش اجزای گسسته	B. K. Mishra	2003	شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای به روش اجزای گسسته
حرکت ذره بر روی الک‌ها - یک مطالعه عددی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای گسسته	Li, et al.	2003	شبیه‌سازی حرکت ذره بر روی الک‌ها

ادامه جدول ۱-۲- خلاصه تحقیقات انجام شده درباره شبیه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای به روش اجزای گسسته

عنوان تحقیق	نام نویسندگان	سال تحقیق	نتایج تحقیق
اعتبارسنجی مدل‌سازی آسیاکنی به روش اجزای گسسته: تاثیر پروفیل لاینر و سرعت آسیا در فرآیند آسیاکنی	Hlungwani et al.	2003	پیش‌بینی الگوی حرکت بار و توان‌کشی برای دو طرح مختلف بالابر (مستطیلی و دوزنقه‌ای) در محدوده وسیعی از سرعت دوران آسیا
بررسی عملکرد رویکردهای برنامه-نویسی و زبان‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی عددی مواد دانه‌ای به روش اجزای گسسته	Balevičius et al.	2006	شبیه‌سازی حرکت بار در آسیاها
مدل‌سازی الگوهای خردایش در یک مقیاس آزمایشی آسیای AG/SAG	Djordjevic et al.	2006	شبیه‌سازی فرآیندهای خردایش آسیاهای گلوله‌ای، خودشکن و نیمه‌خودشکن
DEM: یک نرم‌افزار متن‌باز با استفاده از یک روش اجزای گسسته برای شبیه‌سازی مواد دانه‌ای	Donzé, F. Kozicki, J, V	2009	افزایش پیوسته در توان محاسباتی محققان را قادر می‌سازد، ویژگی‌های کلی توده دانه‌ای را از طریق مشاهده رفتار تک‌تک ذرات استنتاج می‌کنند.
مدل‌سازی به روش اجزای گسسته از جریان دانه‌ای غیرکروی در قیف مستطیل شکل	Tao, et al.	2010	شبیه‌سازی جریان ذرات غیرکروی در قیف‌ها بوسیله اجزای گسسته
عنوان تحقیق	نام نویسندگان	سال تحقیق	نتایج تحقیق
تست اعتبار سنجی مدل‌سازی کروی به روش اجزای گسسته در شبیه‌سازی فرآیندهای آسیاکنی مواد دانه‌ای	Delaney, et al.	2012	شبیه‌سازی جهت بهینه‌سازی فرآیندهای سرنده‌کنی
اعتبار سنجی دو بعدی به روش اجزای گسسته با استفاده از تجزیه و تحلیل تصاویر دیجیتالی آسیاهای گلوله‌ای	Pérez-Alonso, C & Delgadillo, J.A	2012	تجزیه و تحلیل تصاویر دیجیتالی در آسیاهای گلوله‌ای
تأثیر گام زمانی بر دقت نتایج در شبیه‌سازی حرکت ذرات به روش اجزای گسسته	قاسمی و همکاران	۲۰۱۳	تأثیر گام زمانی بر دقت نتایج محاسبات راگ و شبیه‌سازی حرکت ذرات به روش اجزای گسسته بررسی شده است.

تشخیص برخورد ذرات در شبیه‌سازی به روش اجزای گسسته ارائه شده است.	۲۰۱۳	نژادآریا و همکاران	دو الگوریتم تشخیص برخورد ذرات در شبیه‌سازی با روش اجزای گسسته (راگ)
مدل‌سازی آسیای گلوله‌ای	2018	Rodriguez, et al.	درک مدل‌سازی آسیای گلوله‌ای پیشرفته از طریق شبیه‌سازی به روش اجزای گسسته

فصل سوم:

روش تحقیق

۳-۱- روش شبیه‌سازی نرم‌افزار (DEM)

روش اجزای گسسته^۹ یک تکنیک عددی است که برای پیش‌بینی کردن رفتار جریان‌های ذراتی که در آن‌ها برخورد حاکم است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر یک از ذرات در این جریان ردیابی می‌شوند و همه برخوردها بین ذرات و بین ذرات و مرزها مدل می‌شوند. نوع راگ استفاده‌شده در اینجا گاهی اوقات یک روش ذرات نرم^{۱۰} نامیده می‌شود. به ذرات اجازه داده می‌شود که همپوشانی داشته باشند و این میزان همپوشانی به همراه یک قانون نیروی برخورد برای تعیین کردن نیروهای لحظه‌ای حاصل از شناخت مکان‌ها، جهات، سرعت‌ها و چرخش‌های جاری ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰، ۲۷، ۴۰ و ۴۲]. یک مدل برخورد دانه‌ای هرتز-میندلین^{۱۱} جدید در لایتر پیاده‌سازی شده است. در این مدل برخورد، اندرکنش‌ها میان ذرات و ذره-جداره بر طبق یک مدل فنر-کمک فنر^{۱۲} در جهات عمود و مماس بر خطوط مراکزشان هستند [۲۱]. این مدل دانه‌ای از فرمول زیر برای نیروی اصطکاکی بین دو ذره دانه‌ای استفاده می‌کند؛ هنگامی که فاصله r بین دو ذره با شعاع‌های R_i و R_j کمتر از فاصله تماسشان ($d = R_i + R_j$) است. هنگامی که $r > d$ ، هیچ نیرویی بین این ذرات وجود ندارد:

$$\mathbf{F} = (k_n \delta \mathbf{n}_{ij} - \gamma_n \mathbf{v} \mathbf{n}_{ij}) + (k_t \delta \mathbf{t}_{ij} - \gamma_t \mathbf{v} \mathbf{t}_{ij}) \quad (۱-۳)$$

کمیت‌ها در این معادله به صورت زیر هستند:

k_n : ثابت الاستیک برای برخورد عمود

$\delta \mathbf{n}_{ij}$: $d - r$: همپوشانی عمود (فاصله همپوشانی دو ذره)

γ_n : ثابت میرایی ویسکوالاستیک برای برخورد عمود

$\mathbf{v} \mathbf{n}_{ij}$: سرعت عمود نسبی (مؤلفه قائم سرعت نسبی دو ذره)

k_t : ثابت الاستیک برای برخورد مماسی

^۹- Discrete Element Method

^{۱۰}- soft particle

^{۱۱}- Hertz-Mindlin

^{۱۲}- spring-dashpot

δt_{ij} : همپوشانی مماسی (بردار جابجایی مماسی بین دو ذره کروی که برای برآورده کردن یک معیار تسلیم اصطکاکی کوتاه شده است)

γ_t : ثابت میرایی ویسکوالاستیک برای برخورد مماسی

$\mathbf{v}t_{ij}$: سرعت مماسی نسبی (مؤلفه مماسی سرعت نسبی دو ذره).

جمله اول معادله (۱) نیروی عمود (F_n) بین دو ذره است و جمله دوم این معادله نیروی مماسی (F_t) است. نیروی عمود دو جمله دارد: یک نیروی فنر و یک نیروی میرایی. نیروی مماسی نیز دو نوع دارد: یک نیروی برشی و یک نیروی میرایی. نیروی برشی اثر قبلی است که جابجایی مماسی (همپوشانی مماسی) را بین ذرات در طول زمانی که آن ها در تماس هستند، به حساب می آورد.

اصطکاک استاتیکی بوسیله حفظ کردن اثر جابجایی برشی الاستیک در تمام طول عمر تماس به دست می آید. بزرگی δt_{ij} (همپوشانی مماسی) کوتاه می شود همانقدر که برای برآورده کردن یک معیار تسلیم کولن محلی لازم است: $F_t \leq \mu F_n$ ، که در آن μ ضریب اصطکاک ذره-ذره است. بنابراین سطوح تماس به صورت چسبیده تلقی می شوند هنگامی که $F_t < \mu F_n$ ، و به صورت لغزنده هنگامی که معیار تسلیم کولن برآورده شود [۲۱].

با توجه به اینکه مدول برشی (G) می تواند از روی مدول یانگ و نسبت پواسون محاسبه شود، مدل برخورد هرتز-میندلین به پارامترهای مواد زیر بستگی دارد [۲۲]:

ضریب استرداد e

مدول یانگ Y

نسبت پواسون ν

ضریب اصطکاک استاتیکی μ_s

ضریب اصطکاک غلتشی μ_r

ماکزیمم همپوشانی بین ذرات به وسیله سفتی فنر در جهت عمود (k_n) تعیین می‌شود. معمولاً همپوشانی‌های میانگین $0/5 - 0/1$ درصد مطلوب هستند، درحالی‌که آن‌ها مستلزم ثوابت فنر با مرتبه $10^4 - 10^6$ N/m در سه بعد هستند. ضریب میرایی عمود (γ_n) برای تعیین کردن ضریب استرداد مورد نیاز (e) انتخاب می‌شود (که به صورت نسبت مؤلفه عمود پس از برخورد به پیش از برخورد سرعت نسبی تعریف می‌شود [۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۱]. برای مدل هرتز-میندلین، ضرایب k_n, k_t, γ_n و γ_t به صورت زیر از روی خواص مواد محاسبه می‌شوند:

$$k_n = \frac{4}{3} Y^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (2-3)$$

$$\gamma_n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \geq 0 \quad (3-3)$$

$$k_t = 8 G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (4-3)$$

$$\gamma_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} \geq 0 \quad (5-3)$$

معادلات زیر می‌توانند برای دو ذره در حال تماس تعریف شوند (معادلات ۳-۶ تا ۳-۱۲):

$$S_n = 2 Y^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (6-3)$$

$$S_t = 8 G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (7-3)$$

$$\beta = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}} \quad (8-3)$$

$$\frac{1}{Y^*} = \frac{(1-v_1^2)}{Y_1} + \frac{(1-v_2^2)}{Y_2} \quad (9-3)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2(2+v_1)(1-v_1)}{Y_1} + \frac{2(2+v_2)(1-v_2)}{Y_2} \quad (10-3)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (11-3)$$

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (12-3)$$

که در آن‌ها Y مدول یانگ است، G مدول برشی است، ν نسبت پواسون است، e ضریب استرداد است، m جرم است و R شعاع یک ذره است. اندیس‌های ۱ و ۲ نماینده دو ذره در تماس است.

کاربردهای صنعتی تقاضاهای سنگینی را بر قابلیت‌های هندسی کدهای راگ می‌گذارند و می‌توانند عملکرد محاسباتی را تحت تأثیر قرار دهند. در اینجا اشیاء مرزی برای سه بعد بوسیله مش‌های سطحی مثلثی تعریف می‌شوند. این مش‌ها می‌توانند با استفاده از هر تولیدکننده مش منطقی از روی مدل‌های صلب تولیدشده در بسته‌های «کد^{۱۳}» مناسب تولید شوند. این موضوع انعطاف‌پذیری بسیار زیادی را در تعیین کردن محیط‌های سه بعدی که با آن‌ها ذرات اندرکنش می‌کنند، فراهم می‌کند [۱۳، ۱۴، ۲۰ و ۳۱].

قدرت راگ در توانایی‌اش برای حل کردن محیط دانه‌ای در مقیاس ذره نهفته است، بنابراین زنجیره‌های نیروی برخورد واقعی را در نظر می‌گیرد و باعث ظهور پدیده‌های ناشی از هندسه ذرات همراه با حرکت نسبی ذرات، مانند تفکیک ذرات بوسیله نفوذ می‌شود. بدین ترتیب، راگ قادر است که بسیاری از پدیده‌های مختلف فیزیکی، مانند رژیم‌های ذرات متراکم و رقیق، حالت‌های تعادل و جریان دانه‌ای سریع و نیز کند، یا انتشار موج درون مواد دانه‌ای را شبیه‌سازی کند [۵۸، ۵۹ و ۶۰].

در روش اجزای گسسته، ذرات به طور معمول به وسیله دیسک‌ها یا کره‌ها به ترتیب در دو و سه بعد تقریب زده می‌شوند. این شکل‌ها به خاطر بازدهی محاسباتی‌شان ترجیح داده می‌شوند. برخورد همیشه روی خطی است که مرکز هر یک از ذرات را متصل می‌کند و تشخیص آن به اندازه مقایسه کردن فاصله بین مراکز آن‌ها با مجموع شعاع‌های‌شان ساده است [۳۷ و ۴۰]. اگرچه ذرات در فرآیند سرنندگی شکل کاملاً نامنظم دارند، شکل مواد دانه‌ای در راگ معمولاً به خاطر سهولت تشخیص برخورد یا محاسبه نیروی برخورد فرض می‌شود که کروی باشد. بهترین راه حل برای در نظر گرفتن شکل ذرات در راگ مدل کردن شکل دقیق ذرات است. عیب این روش این است که گام زمانی باید بی‌نهایت کوچک انتخاب شود به سبب آنکه نیروی برخورد یک رفتار بسیار سفت را به

¹³- Computer Aided Design (CAD)

نمایش می‌گذارد. بسته به خواص مواد و اندازه ذرات، اندازه گام زمانی می‌تواند برای یک شبیه‌سازی دقیق و صحیح به اندازه مرتبه 10^{-6} ثانیه پایین باشد [۵۸]. اخیراً به دلیل پیشرفت توان محاسباتی، راگ بیش از پیش قابل‌دسترس شده است. در کامپیوترهای رومیزی واقعی، شبیه‌سازی‌هایی تا یک میلیون ذره می‌توانند اجرا شوند. در خوشه‌های^{۱۴} بسیار بزرگ، مسیرهای صدها میلیون ذره می‌توانند محاسبه شوند [۵۸، ۵۹ و ۶۰].

روش اجزای گسسته از یک طرح عددی صریح برای ردیابی کردن حرکت تک‌تک ذرات بر طبق اندرکنششان با یکدیگر استفاده می‌کند [۶۳ و ۶۵]. در چارچوب راگ همه ذرات در حوزه محاسباتی به یک شیوه لاگرانژی ردیابی می‌شوند، که به طور صریح مسیر هر ذره را بر اساس موازنه‌های نیرو و گشتاور حل می‌کند [۵۸، ۵۹، ۶۰ و ۶۵]. برای هر ذره، حرکت انتقالی و حرکت دورانی، که می‌توانند بوسیله قانون دوم حرکت نیوتن توصیف شوند:

$$\dot{\mathbf{v}} = \frac{\sum \mathbf{F}}{m} + \mathbf{g} \quad (۱۳-۳)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \frac{\sum \mathbf{M}}{I} \quad (۱۴-۳)$$

که در آن‌ها $\mathbf{v}$ بردار سرعت یک ذره است، $\mathbf{F}$ نیروی برخوردی است که روی یک ذره عمل می‌کند، m و $\mathbf{g}$ جرم یک ذره و شتاب گرانشی هستند، $\boldsymbol{\omega}$ بردار سرعت زاویه‌ای است، $\mathbf{M}$ و $\mathbf{I}$ بر گشتاور ناشی از نیروی مماسی و گشتاور لختی دلالت می‌کنند. با دانستن نیروهای گوناگونی (نیروهای برخورد و گرانشی) که روی ذرات عمل می‌کنند، سرعت و مسیر هر یک از تک‌تک ذرات با انتگرال‌گیری نسبت به زمان محاسبه می‌شوند. این امر به همه ذرات اجازه می‌دهد که در یک حوزه از پیش تعریف شده به ثبت برسند، بنابراین اندرکنش‌ها بین ذرات و با مرزها می‌توانند به طور دقیق با استفاده از خواص مرزی و ذرات محلی محاسبه شوند [۶۱ و ۶۲].

کاربرد راگ در یک سیستم شامل گام‌های اساسی زیر می‌شود [۳۵].

- تنظیم و راه‌اندازی شرایط اولیه ذرات و دیوارها.
- جستجو برای برخوردها بین ذرات.

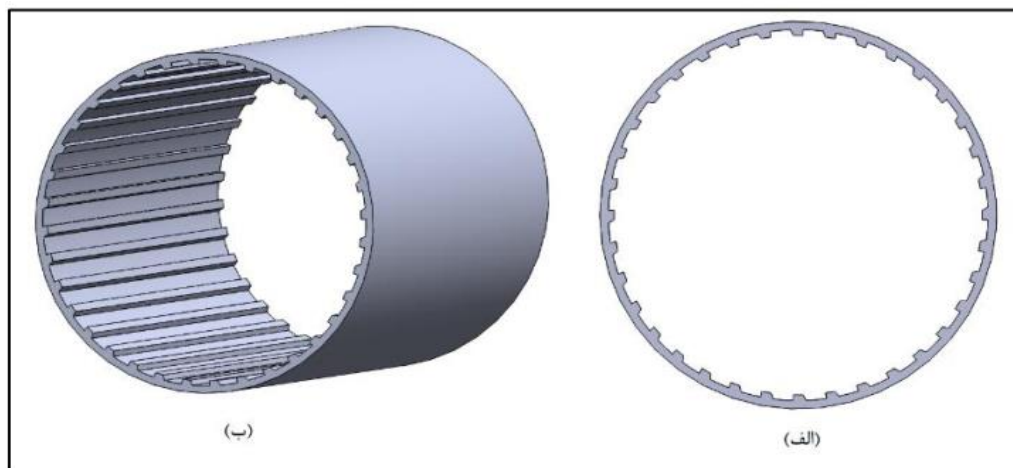
¹⁴- cluster

- اعمال قوانین اندرکنش (محاسبه نیروها و گشتاورها) به همه برخورد‌های ذره-ذره و ذره-دیوار.
- اعمال قانون دوم نیوتن برای تعیین حرکت ذرات، پیش‌بینی موقعیت‌ها، سرعت‌ها، شتاب‌ها و مشتقات زمان مرتبه بالاتر.
- به روز رسانی وضعیت فعلی ذرات و دیوارها.
- تخصیص دادن یک زمان جدید $t = t + \Delta t$.
- اگر زمان کنونی درون دوره زمانی کلی است ($t \leq T$)، برو به گام ۲، و در غیر این صورت برو به گام بعدی.
- پس پردازش، تجسم

شکل ۳-۱ تصویر نقشه آسیای گلوله‌ای است که با همکاری پرسنل دفتر فنی شرکت آسفالت طوس تهیه شد، و با استفاده از این نقشه، هندسه آن برای انجام شیشه‌سازی ترسیم گردید.

شکل ۳-۱: نقشه آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان

در این تحقیق، آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس با لاینر خاص خود شبیه‌سازی شد. (شکل ۳-۲)



شکل ۳-۲: هندسه‌های (الف) دو بعدی و (ب) سه بعدی آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان

مشخصات هندسی و ابعاد آسیای گلوله‌ای صنعتی شرکت آسفالت طوس سنگان در جدول ۳-۱ قابل مشاهده است. جدول ۳-۲ توزیع‌های مختلف اندازه گلوله‌های استفاده‌شده در شبیه‌سازی راگ آسیای گلوله‌ای آسفالت طوس سنگان را نشان می‌دهد.

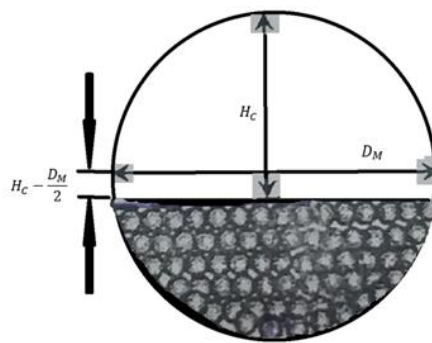
همان‌طور که مشاهده می‌شود چهار اندازه گلوله (۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتیمتری) و ترکیب‌های گوناگون از آنها با درصد حجمی یکسان در شبیه‌سازی‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. جدول ۳-۱ نیز پارامترهای استفاده‌شده برای شبیه‌سازی راگ آسیای گلوله‌ای مقیاس صنعتی را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که جنس گلوله‌های استفاده شده در این شبیه‌سازی فولاد ضد زنگ می‌باشد. پارامترهای استفاده‌شده در جدول مذکور متعلق به فولاد ضد زنگ هستند و برخی از آن‌ها مانند ضریب اصطکاک لغزشی گلوله‌ها، ضریب اصطکاک غلتکی گلوله‌ها، نسبت پواسون، مدول یانگ، ضریب استرداد گلوله‌ها از وبسایت‌های معتبر اینترنتی بدست آمده‌اند.

جدول ۳-۱: ابعاد آسیای گلوله‌ای صنعتی شرکت آسفالت طوس سنگان

ابعاد	آسیای گلوله‌ای صنعتی شرکت آسفالت طوس سنگان
۱۱	طول آسیا (m)
۵/۵۰	قطر آسیا (m)
۲۴۶/۳۵۷۰	حجم آسیا در حالت بدون لیfter (m^3)
۱۶/۷	سرعت بحرانی (N_C) (rpm)
ساعتگرد	جهت چرخش آسیا
۱۳/۴	ضخامت ماکزیمم لاینر (cm)

۳-۳- روش محاسبه تعداد گلوله استفاده شده در شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای

گام اول: باید حجم بار^{۱۵} یا درصد حجم اشغال شده فضای داخل آسیا توسط گلوله‌ها، که شامل فضای خالی بین گلوله‌ها نیز می‌شود، محاسبه گردد [۱].



شکل ۳-۳: تصویر داخل آسیا در حالت ساکن

$$\text{حجم گلوله‌ها} = \left[\frac{1}{2} \pi \frac{D_M^2}{4} - D_M \left(H_C - \frac{D_M}{2} \right) \right] L \quad (۱۵-۳)$$

¹⁵Charge volume

$$\text{درصد حجم آسیا اشغال شده توسط گلوله‌ها} = \left[\left(\frac{\left[\left(\frac{\pi}{8} + \frac{1}{2} \right) D_M^2 - D_M - H_C \right] L}{\frac{L \pi D_M^2}{4}} \right) 100 \right] \quad (۱۶-۳)$$

$$\text{حجم بار } (\%) = 113.7 - 127.3 \frac{H_C}{D_M} \quad (۱۷-۳)$$

H_C : فاصله بین گلوله‌های ساکن و بالای آسیا

D_M : قطر داخلی آسیا

L : طول آسیا

گام دوم: تعداد گلوله از تقسیم حجم اشغال شده توسط کل گلوله‌ها به حجم یک گلوله (گلوله‌های) استفاده شده محاسبه می‌شود [۱].

جدول ۲-۳: توزیع اندازه گلوله‌های استفاده شده در شبیه‌سازی راگ آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان

تعداد گلوله‌های راگ شبیه‌سازی	درصد حجمی (%)	کلاس اندازه گلوله (cm)
۱۴۷۰۳۳۵	۱۰۰	۴
۴۳۵۶۵۵	۱۰۰	۶
۱۸۳۷۹۱	۱۰۰	۸
۹۴۱۰۱	۱۰۰	۱۰
۹۵۲۹۹۵	۵۰ و ۵۰	۴ و ۶
۸۲۷۰۶۳	۵۰ و ۵۰	۴ و ۸
۷۸۲۲۱۸	۵۰ و ۵۰	۴ و ۱۰
۳۰۹۷۲۳	۵۰ و ۵۰	۶ و ۸
۲۶۴۸۷۸	۵۰ و ۵۰	۶ و ۱۰
۱۳۸۹۴۶	۵۰ و ۵۰	۸ و ۱۰
۶۹۶۵۲۴	۳۳/۳ و ۳۳/۳، ۳۳/۳	۴، ۶ و ۸
۶۶۶۶۳۰	۳۳/۳ و ۳۳/۳، ۳۳/۳	۴، ۶ و ۱۰
۵۸۲۶۸۴	۳۳/۳ و ۳۳/۳، ۳۳/۳	۴، ۸ و ۱۰
۲۳۷۸۲۵	۳۳/۳ و ۳۳/۳، ۳۳/۳	۶، ۸ و ۱۰
۵۴۵۹۷۱	۲۵ و ۲۵، ۲۵، ۲۵	۴، ۶، ۸ و ۱۰

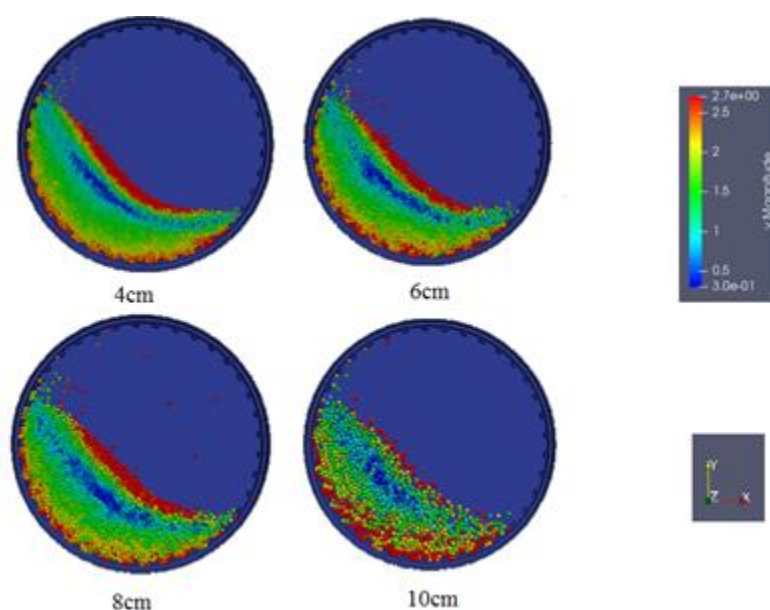
جدول ۳-۳: پارامترهای استفاده شده برای شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای مقیاس صنعتی

مقدار	جزئیات مدل راگ
۴۰	٪ پرشوندگی بار آسیا
10^9	ثابت فنر راگ (kg/m)
۸۰۵۰	چگالی گلوله ها (kg/m^3)
۰/۵	ضریب اصطکاک لغزشی گلوله ها
۰/۰۰۱۵	ضریب اصطکاک غلتکی گلوله ها
۰/۲۸۵	نسبت پواسون
1×10^9	مدول یانگ (N/m^2)
۰/۸۱۷	ضریب استرداد گلوله ها

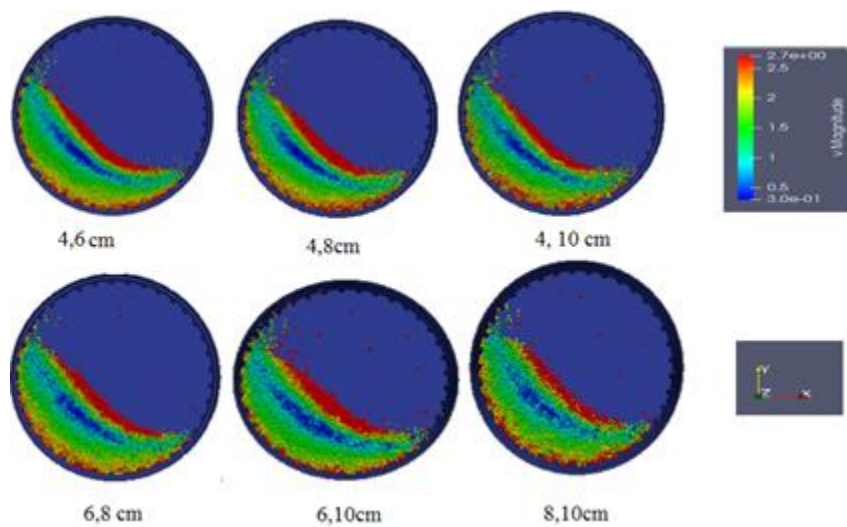
فصل چهارم:

نتایج و بحث

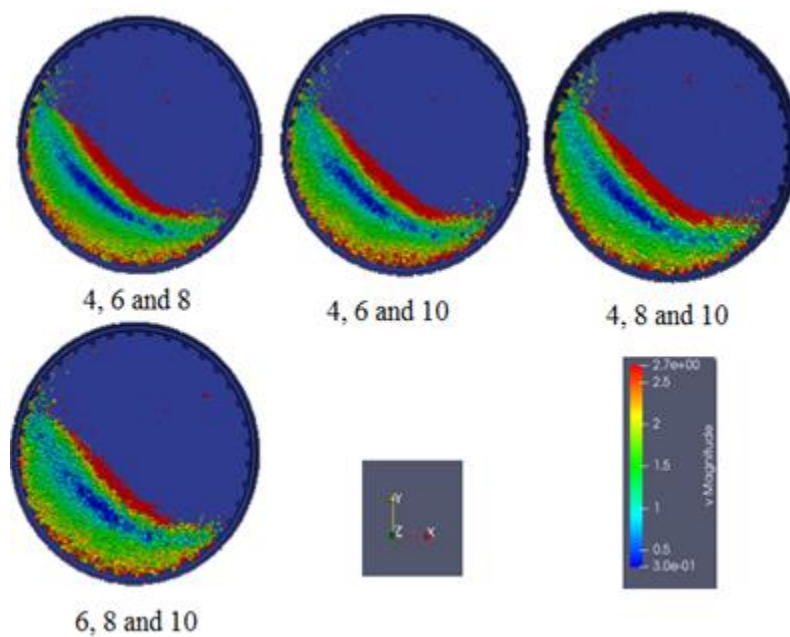
گلوله‌های با اندازه بزرگتر گیر می‌نمایند و نیز ترکیب گلوله‌هایی با اندازه بزرگ نزدیک بهم مثل ۸ و ۱۰ سانتیمتری ارتفاع شانه بار خرد کننده را کاهش می‌دهد. اما این گونه توزیع اندازه گلوله برای قطرهای کوچک مانند ۴ و ۶ سانتیمتری عملکرد آسیا و مکانیزم خردایش آن را بهبود می‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت در انتخاب گلوله برای آسیای گلوله‌ای سنگان با یک اندازه گلوله، گلوله ۶ سانتیمتری، با دو اندازه گلوله، گلوله‌های ۴ و ۸ سانتیمتری، و در انتخاب بار خردکننده با سه اندازه گلوله مختلف توزیع ۴، ۶ و ۱۰ سانتیمتری بهترین عملکرد را در ایجاد حرکت آبشاری بزرگ و بهبود مکانیزم خردایش دارند.



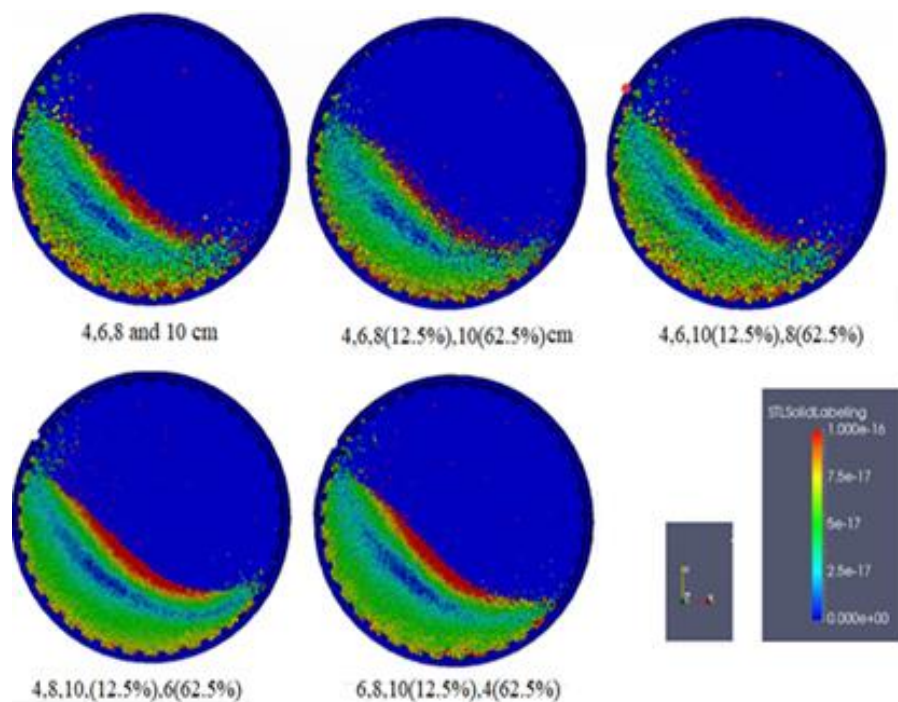
شکل ۴-۱: تصاویر شبیه‌سازی‌های سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع تک گلوله‌ای هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی



شکل ۴-۲: تصاویر شبیه‌سازی‌های سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع دو گلوله‌ای هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی



شکل ۴-۳: تصاویر شبیه‌سازی‌های سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع سه گلوله‌ای هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی

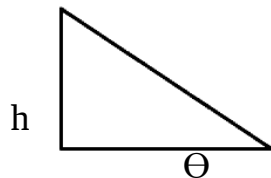


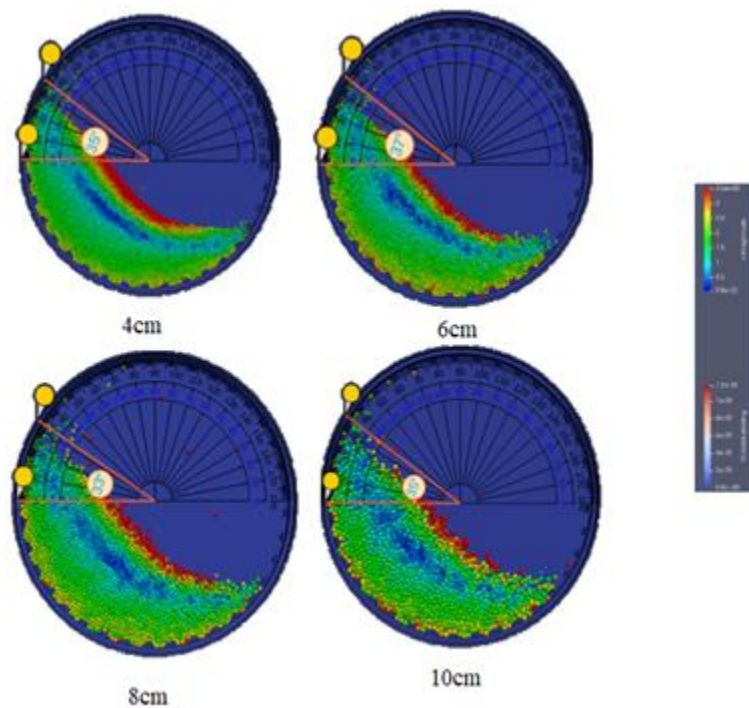
شکل ۴-۴: تصاویر شبیه‌سازی‌های سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع چهار گلوله‌ای هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی

۴-۲- روش بدست آوردن ارتفاع بار

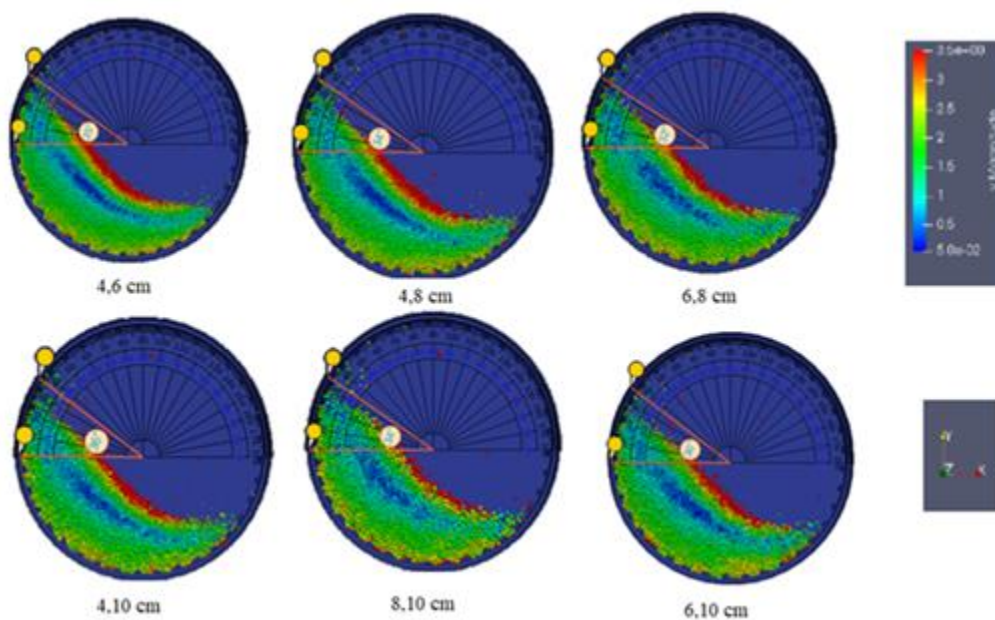
با استفاده از مقاله آنالین زاویه‌های مختلف سقوط بار را برای تصاویر سه بعدی ۱-۴ تا ۴-۴ مانند ۴-۵ تا ۴-۸ اندازه‌گیری کرده و زوایای بدست آمده از رابطه ۴-۱ ارتفاع بار هر تصویر محاسبه می‌شود.

$$h = r + r \sin \theta \quad (1-4)$$

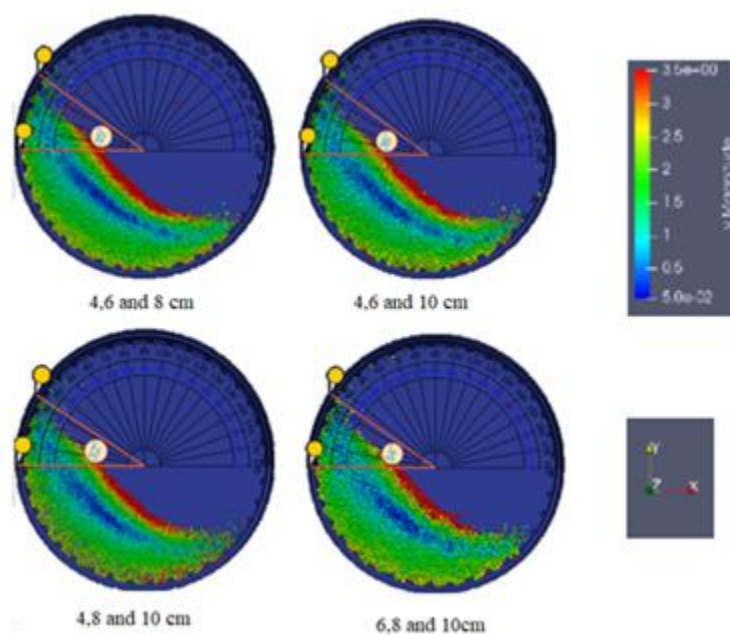




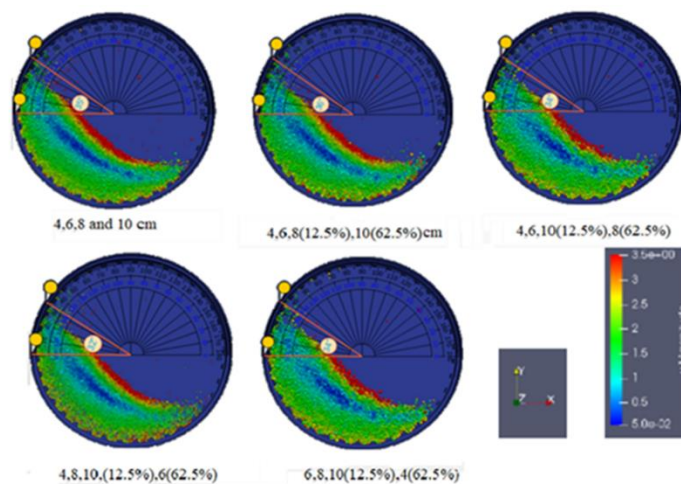
شکل ۴-۵: استفاده از نقاله آنالین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار توزیع تک گلوله‌ای در شبیه‌سازی‌های راگ آسیای گلوله‌ای
ای شرکت آسفالت طوس سنگان



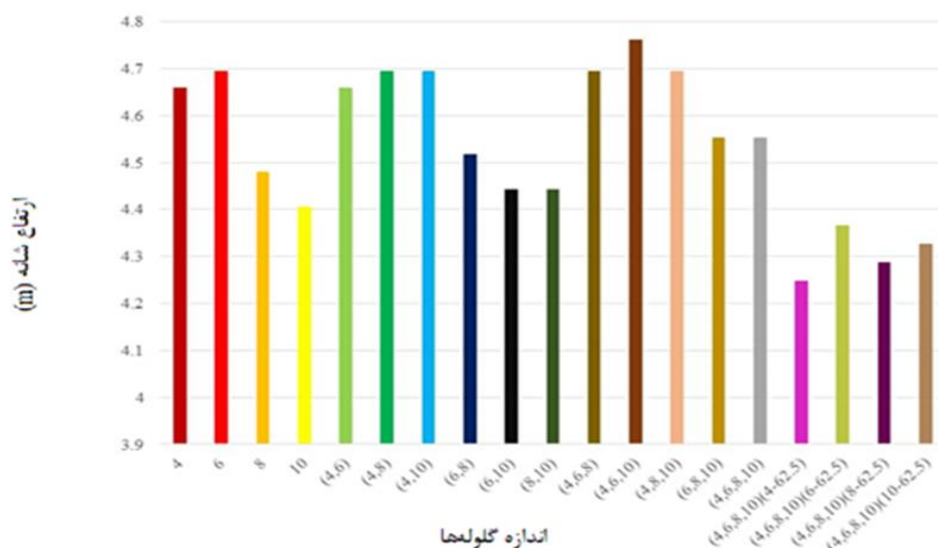
شکل ۴-۶: استفاده از نقاله آنالین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار توزیع دو گلوله‌ای در شبیه‌سازی‌های راگ آسیای گلوله‌ای
شرکت آسفالت طوس سنگان



شکل ۴-۷: استفاده از نقاله آنالین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار توزیع سه گلوله‌ای در شبیه‌سازی‌های راگ آسیای گلوله-ای شرکت آسفالت طوس سنگان



شکل ۴-۸: استفاده از نقاله آنالین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار توزیع چهار گلوله‌ای در شبیه‌سازی‌های راگ آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان

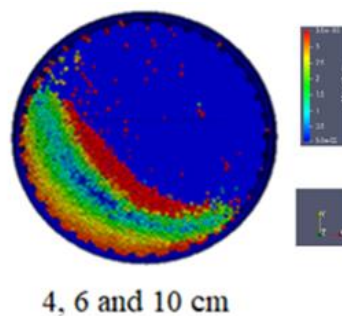


شکل ۴-۹: ارتفاع شانه بار برای پانزده توزیع مختلف از اندازه بار خرد کننده در آسیای گلوله ای شرکت آسفالت طوس سنگان

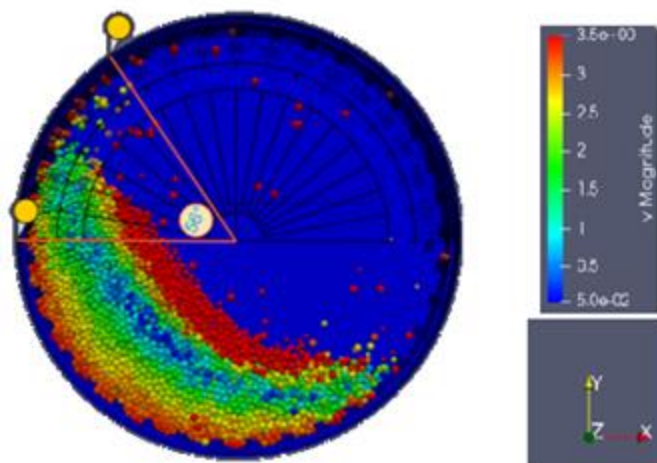
شکل ۴-۹ ارتفاع شانه بار برای پانزده توزیع مختلف اندازه گلوله‌ها در شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از روش راگ را برای آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان نشان می‌دهد. شایان ذکر این‌که در حال حاضر در شرکت فوق از ترکیب گلوله‌های ۴ و ۶ سانتیمتری با درصد حجمی یکسان استفاده می‌شود (دیاگرام سبز رنگ). همان‌طور که از شکل پیداست، در حالت تک اندازه (دیاگرام قرمز رنگ) بیشترین ارتفاع شانه بار متعلق به گلوله‌های ۴ و ۶ سانتیمتری است که در مقایسه با دیاگرام سبز رنگ نیز ارتفاع بالاتری دارد. در نتیجه می‌توان گفت اگر در کارخانه سنگان از گلوله‌های ۴ و ۶ سانتیمتری به تنهایی استفاده شود، خردایش به نحو بهتری صورت می‌گیرد. در حالت دو اندازه‌ای (دیاگرام‌های آبی رنگ)، بالاترین ارتفاع شانه بار مربوط به ترکیب گلوله‌های ۴ و ۱۰ سانتیمتری و نیز گلوله‌های ۴ و ۸ و همچنین ۴ و ۱۰ سانتیمتری است که نسبت به حالت موجود (دیاگرام سبز) ارتفاع بالاتری را ایجاد می‌کنند. اما سایر ترکیبات گلوله‌ها دارای ارتفاع شانه کمتری می‌باشند و بنابراین برای کارخانه سنگان پیشنهاد نمی‌شوند. در کل می‌توان نتیجه گرفت که به جای گلوله‌های ۶ و ۴ سانتیمتری در آسیای سنگان می‌توان از گلوله‌های (۴ و ۱۰) و (۴ و ۸) سانتیمتری استفاده نمود. در حالت سه اندازه‌ای (دیاگرام‌های

قهوه‌ای رنگ)، بالاترین ارتفاع شانه به ترتیب مربوط به ترکیب‌های گلوله‌های (۴، ۶، ۱۰)، (۴، ۸، ۱۰)، (۶، ۸ و ۱۰) و (۴، ۶ و ۸) سانتیمتری است، بنابراین این چهار توزیع گلوله‌ها برای آسیای سنگان پیشنهاد می‌شود. به عبارت دیگر با افزودن گلوله‌های ۸ و ۱۰ سانتیمتری به آسیا می‌توان عملکرد آن را به نحو چشم‌گیری بهبود بخشید. ترکیب گلوله‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتیمتری نیز توصیه نمی‌شود چرا که این ترکیب ارتفاع شانه نسبتاً پایین‌تری نسبت به حالت موجود (دیاگرام سبز رنگ) ایجاد می‌کند. و همچنین ترکیب چهار اندازه‌ای با درصد حجمی متفاوت (دیاگرام بنفش رنگ) نیز توصیه نمی‌شود چرا که ارتفاع کمتری نسبت به حالت موجود (دیاگرام سبز رنگ) ایجاد کرده است.

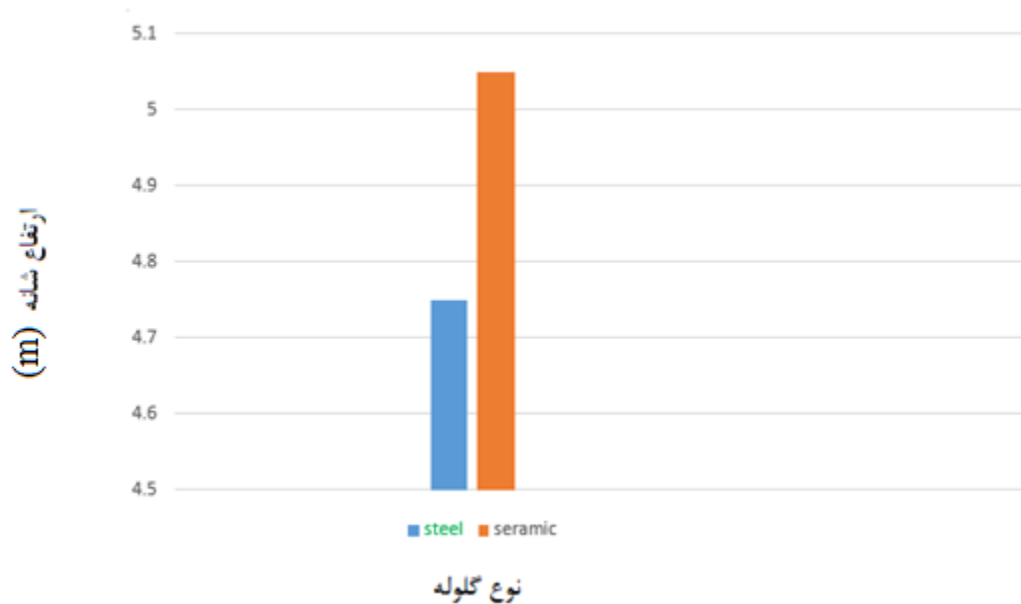
با توجه به شکل ۴-۹ و مقایسه نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بالاترین ارتفاع شانه بار مربوط به توزیع (۴، ۶، ۱۰) سانتیمتری که اختلاف ارتفاع حدود ۱۷/۷۹ سانتیمتر ایجاد می‌کند، که حالت بهینه ممکن برای آسیای گلوله‌ای سنگان است، پیشنهاد می‌شود. همچنین حالت بهینه بدست آمده از شکل ۴-۹ با گلوله سرامیکی نیز شبیه‌سازی شد (شکل ۴-۱۰).



شکل ۴-۱۰: تصویر شبیه‌سازی سه بعدی راگ که حرکت ذرات را در آسیای گلوله‌ای با گلوله سرامیکی، با توزیع مختلف اندازه گلوله‌ها هنگام چرخش آسیا با ۸۰٪ سرعت بحرانی



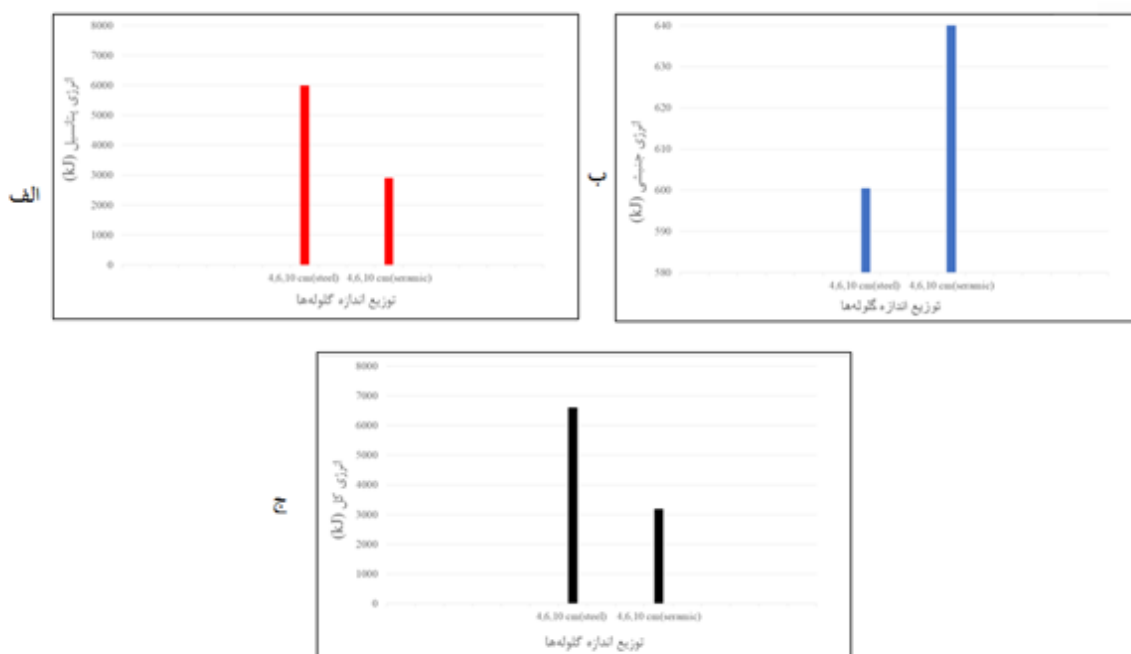
شکل ۴-۱۱: استفاده از نقاله آنالین جهت تعیین زاویه و ارتفاع شانه بار در شبیه‌سازی راگ آسیای گلوله‌ای با گلوله سرامیکی، با توزیع‌های مختلف اندازه گلوله‌ها هنگامی که آسیا ۸۰٪ سرعت بحرانی‌اش می‌چرخد.



شکل ۴-۱۲: مقایسه ارتفاع شانه بار حالت بهینه برای گلوله فولادی و سرامیکی از اندازه بار خرد کننده در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان

با توجه به شکل ۴-۱۲ مشخص شد ارتفاع بدست آمده از گلوله‌های سرامیکی نسبت به گلوله‌های فولادی حدود ۳۵ سانتیمتر بیشتر می‌باشد که این امر به دلیل پایین بودن چگالی گلوله‌های سرامیکی می‌باشد، که در نتیجه

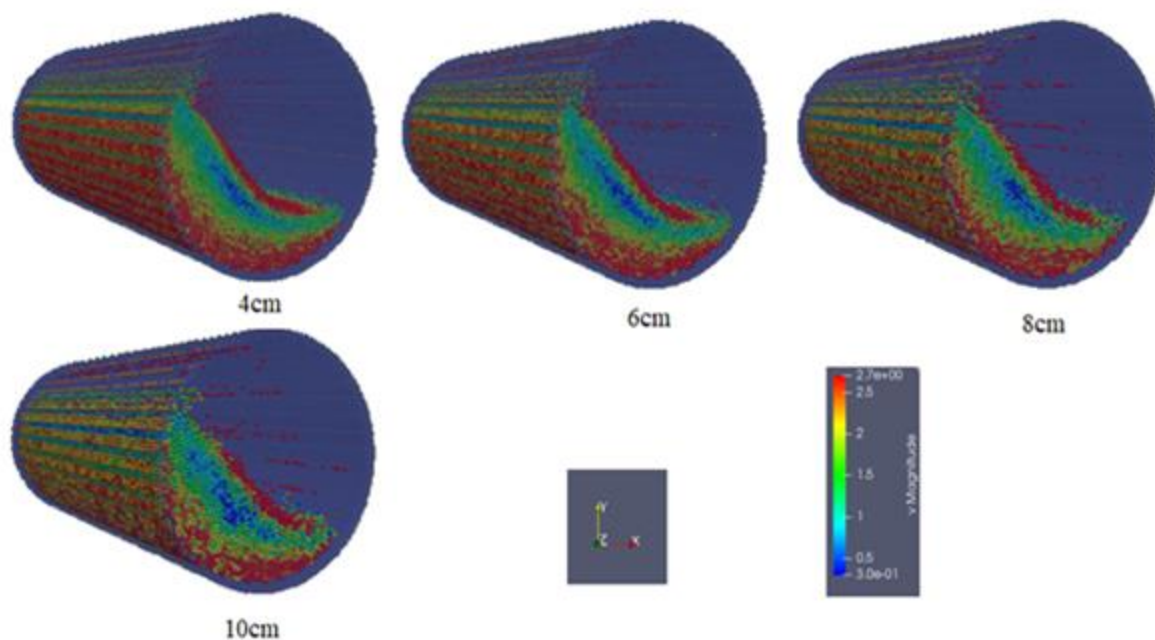
آن را سبک‌تر می‌کند. اما داشتن ارتفاع زیاد به این معنا نیست که عملکرد بهتری در خردایش آسیا دارند زیرا جرم کمتر مساوی با ضربه با فشار کمتر بر مواد موقع پاشنه بار می‌باشد، انتخاب گلوله فولادی یا سرامیکی با توجه به سختی مواد معدنی انجام می‌شود.



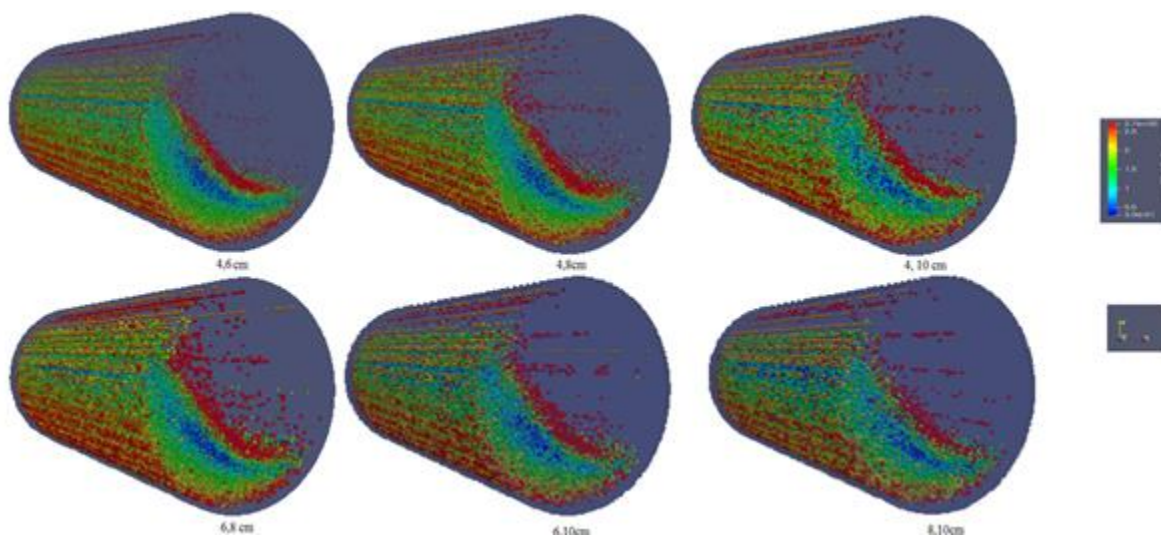
شکل ۴-۱۳: مقایسه مقادیر (الف) انرژی پتانسیل، (ب) انرژی جنبشی، و (ج) انرژی کل، بار خردکننده حالت بهینه برای گلوله فولادی و سرامیکی از اندازه بار خرد کننده در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان

باتوجه به شکل ۴-۱۳ (الف) انرژی پتانسیل گلوله فولادی (۵۹۹۷/۹۱۵ kJ) از گلوله سرامیکی (۲۹۰۵/۸۲ kJ)، (ب) انرژی جنبشی گلوله فولادی (۶۰۰/۴۸۲۱ kJ) از گلوله سرامیکی (۲۹۰/۹۱۷ kJ) و (ج) انرژی کل گلوله فولادی (۶۵۹۸/۳۹۷ kJ) از گلوله سرامیکی (۳۱۹۶/۷۴ kJ) بیشتر است، از آنجاییکه در خردایش انرژی بار خردکننده از ارتفاع شانه بار مهم‌تر می‌باشد، در نتیجه گلوله سرامیکی مناسب آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان نمی‌باشد.

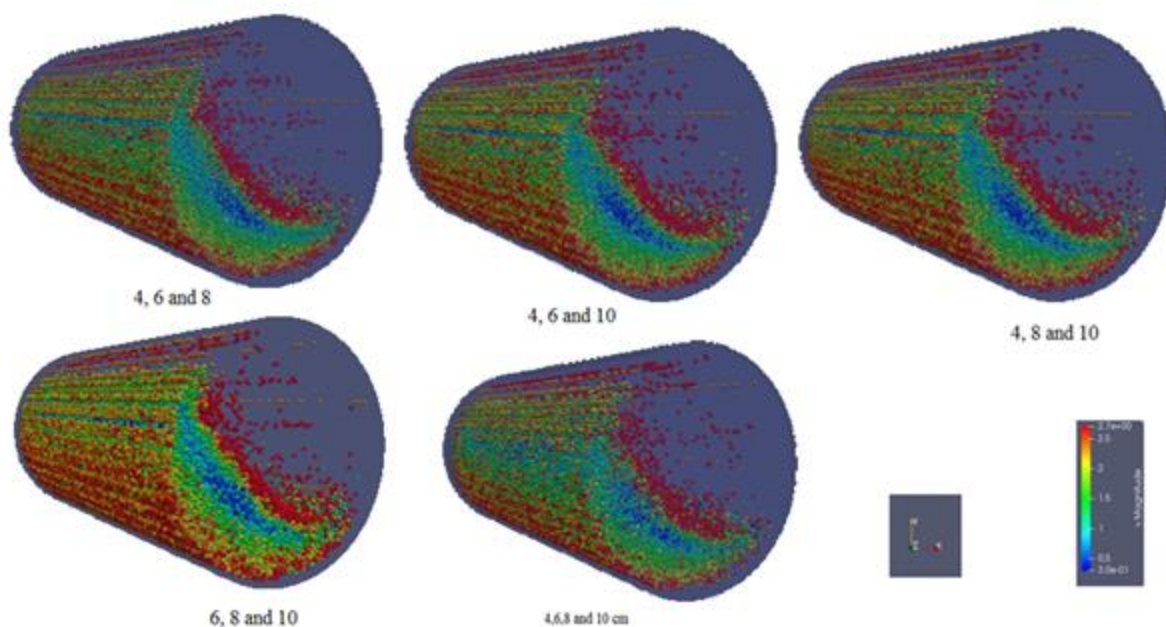
همچنین شکل‌های ۴-۱۴ تا ۴-۱۷ از دیدگاه انرژی مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن به شرح زیر است: با مقایسه شبیه‌سازی‌هایی که در آن‌ها فقط یک اندازه گلوله مورد استفاده قرار گرفته است، مشاهده می‌شود که در شبیه‌سازی صورت‌گرفته برای گلوله‌های ۴ سانتیمتری، گلوله‌ها به میزان بیشتری پرتاب شده‌اند و سرعت بالاتری به دست آورده‌اند. در نتیجه می‌توان گفت انرژی جنبشی بیشتری نسبت به سایر شبیه‌سازی‌های تک سایزی دارند. همچنین، در تمامی شبیه‌سازی‌ها، ارتفاع شانه بار گلوله‌ها تقریباً برابر است. در نتیجه می‌توان پیش‌بینی نمود در شبیه‌سازی‌هایی که در آن‌ها از گلوله‌های ۸ سانتیمتری و ۱۰ سانتیمتری استفاده شده است، میزان انرژی پتانسیل گلوله‌ها بیشتر از شبیه‌سازی‌هایی باشد که در آن‌ها از گلوله‌های ۴ سانتیمتری و ۶ سانتیمتری استفاده شده است. در کل، هر جا گلوله‌های ۴ سانتیمتری در شبیه‌سازی‌ها وجود دارند، به علت سبک بودن آنها، سرعت آنها و در نتیجه انرژی جنبشی کل گلوله‌ها به شدت اضافه می‌شود. با وجود این، مجدداً به علت سبک بودن آنها میزان انرژی پتانسیل کل گلوله‌ها به شدت کاهش می‌یابد. درواقع، رابطه معکوسی بین انرژی جنبشی و پتانسیل گلوله‌ها و اندازه آن‌ها برقرار است. همان‌طور می‌توان نتیجه گرفت که اندازه گلوله‌ها تأثیر چندانی بر ارتفاع شانه بار ندارد و فقط بر ارتفاع پاشنه بار موثر می‌باشد. گلوله‌های سبک‌تر بیشتر به جداره آسیا برخورد می‌کنند و نیاز به سرعت چرخش کمتری دارند. اما گلوله‌های درشت‌تر ممکن است به علت سرعت پایین به پاشنه بار نرسند، بنابراین، برای ایجاد پاشنه بار مناسب در آن‌ها باید سرعت آسیا مقداری بیشتر شود. بهترین توزیع گلوله‌ها، توزیعی است که مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل (انرژی کل) بار خردکننده در آن‌ها بیشتر شود. بهترین توزیع گلوله‌ها، توزیعی است، که مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل (انرژی کل) بار خردکننده در آن ماکزیمم شود تا انرژی بیشتری به بار خردشونده (ذرات) اعمال نماید و در نتیجه عملکرد آسیا و مکانیزم خردایش را بهبود بخشد.



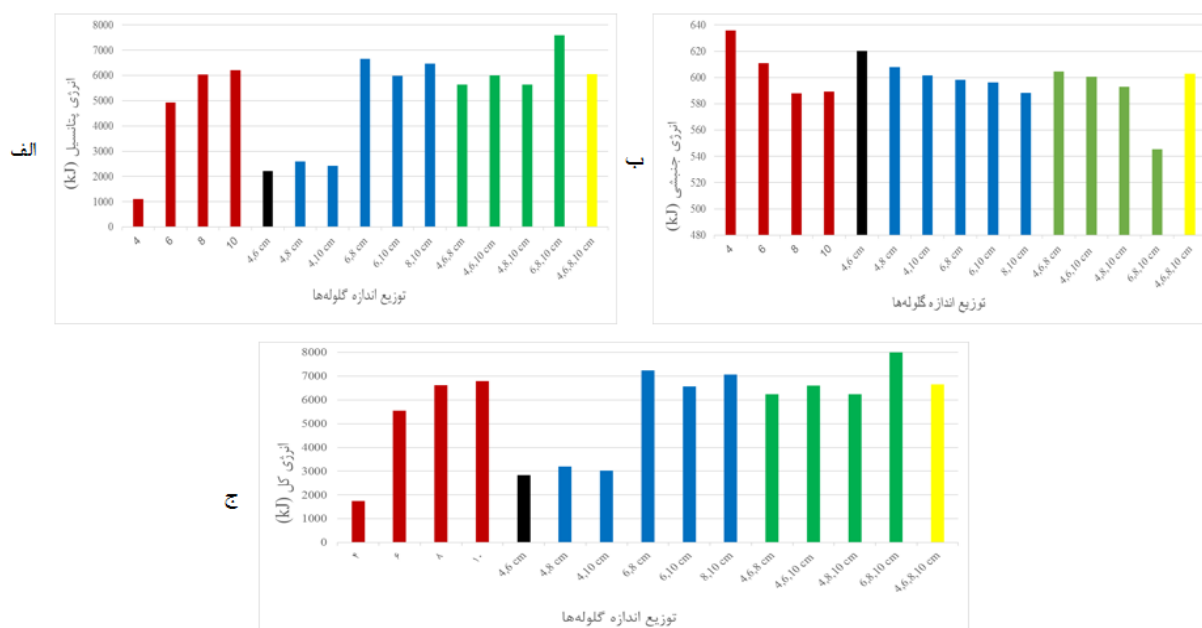
شکل ۴-۱۴: تصاویر سه بعدی (دید از بغل) شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای سنگان با توزیع تک گلوله ای در ۸۰٪ سرعت بحرانی



شکل ۴-۱۵: تصاویر سه بعدی (دید از بغل) شبیه سازی راگ آسیای گلوله ای سنگان با توزیع دو گلوله ای در ۸۰٪ سرعت بحرانی



شکل ۴-۱۶: تصاویر سه بعدی (دید از بغل) شبیه‌سازی راگ آسیای گلوله‌ای سنگان با توزیع سه و چهار گلوله‌ای در ۸۰٪ سرعت بحرانی



شکل ۴-۱۷: مقادیر (الف) انرژی جنبشی، (ب) انرژی پتانسیل، و (ج) انرژی کل، بار خردکننده آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان با پانزده توزیع اندازه مختلف بار خردکننده

شکل ۴-۱۷ مقادیر انرژی‌های جنبشی، پتانسیل و کل (مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل) بار خردکننده (گلوله‌ها) آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان با توزیع اندازه مختلف بار خردکننده را نشان می‌دهد. نتایج زیر از شکل ۴-۱۷ حاصل می‌شوند: از آنجایی که انرژی جنبشی رابطه مستقیمی با سرعت گلوله‌ها دارد، لذا در آسیای گلوله‌ای هرچه گلوله‌ها جرم کمتری داشته باشند، بیشتر پرتاب می‌شوند و سرعت بیشتری می‌گیرند در نتیجه انرژی جنبشی بیشتری نیز دارند. مطابق شکل ۴-۱۶ (الف)، بیشترین و کمترین انرژی جنبشی به ترتیب مربوط به توزیع اندازه گلوله‌های ۴ سانتیمتری به میزان $55/645$ kJ و توزیع اندازه گلوله‌های ۸ و ۱۰ سانتیمتری به میزان $42/588$ kJ می‌باشد. همچنین از آنجایی که انرژی پتانسیل رابطه مستقیمی با جرم و ارتفاع دارد، با مشاهده شکل شکل ۴-۱۶ (ب) می‌توان پی برد که بیشترین انرژی پتانسیل گلوله با توزیع ۱۰ سانتیمتری، ۸ سانتیمتری، توزیع (۸ و ۱۰) سانتیمتری و توزیع (۴، ۶ و ۱۰) سانتیمتری دارای بیشترین انرژی پتانسیل به ترتیب به میزان $25/6202$ kJ، $6/6036$ kJ و $79/5979$ kJ و $91/5997$ kJ کمترین انرژی پتانسیل مربوط به توزیع ۴ سانتیمتری به میزان $83/1109$ kJ، که علت این امر زیاد بودن جرم این اندازه گلوله‌ها می‌باشد. همچنین با مقایسه مقادیر انرژی جنبشی و پتانسیل می‌توان فهمید که مقادیر انرژی پتانسیل بار خردکننده بسیار موثرتر از انرژی جنبشی آن است و این بدان معناست که ایجاد ارتفاع و شانه بار مناسب برای بار خردکننده از اهمیت بالایی برخوردار است. نکته قابل توجه دیگر وجود رابطه معکوس بین انرژی‌های جنبشی و پتانسیل در اندازه‌های گوناگون گلوله‌ها بود. به عبارت دیگر گلوله‌های با قطر کمتر دارای انرژی جنبشی بالاتر و انرژی پتانسیل کمتر هستند و بالعکس. بطور کلی با توجه به قسمت (ج)، مجموع انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی (انرژی کل) گلوله‌هایی بیشتر است که انرژی پتانسیل آن‌ها بیشتر بوده است. در نتیجه انرژی پتانسیل ذرات بار خردکننده در آسیای گلوله‌ای تاثیر بیشتری بر عملکرد آسیا و بهبود عملیات خردایش آن دارد. شایان ذکر است که بین پانزده توزیع اندازه گلوله‌های استفاده شده در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان توزیع‌های گلوله‌های ۸ سانتیمتری، ۱۰ سانتیمتری، (۶ و ۱۰) سانتیمتری و (۴، ۶ و ۱۰) سانتیمتری به ترتیب با مقادیر انرژی کل $7/6624$ kJ،

۶۷۹۱/۴۳ kJ، ۶۵۷۶/۰۴ kJ و ۶۵۹۸/۴ kJ عنوان بهترین‌های توزیع اندازه گلوله برای انتقال انرژی از آسیا به بار خردکننده می باشند، به همین دلیل بهتر است از گلوله‌های بزرگتر با قطر ۸ یا ۱۰ سانتیمتر و یا ترکیب آنها استفاده شود.

فصل پنجم:

نتیجہ گیری و پیشہاد

۵-۱ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، با استفاده از یک نرم‌افزار متن‌باز (open source) به نام لایتنز (LIGGGHTS) عملیات آسیاکنی یک آسیای گلوله‌ای مقیاس صنعتی مربوط به شرکت آسفالت طوس سنگان با پانزده توزیع اندازه مختلف از بار خردکننده آن شبیه‌سازی شد. همچنین نشان داده شد که جرم و اندازه بار خردکننده (گلوله‌ها) تاثیر مستقیمی بر ارتفاع شانه بار و به طور کل عملکرد آسیای گلوله‌ای دارد، بطوری‌که هر چه اندازه گلوله کمتر باشد (وزن کمتری داشته باشد) بار خرد کننده بیشتر پرتاب می‌شود و حرکت آبخاری بزرگ در آسیا با ارتفاع بیشتری صورت می‌گیرد و بر عکس. همچنین نتایج کلی زیر حاصل شدند:

- بطور کلی اگر قرار باشد از یک اندازه گلوله در آسیای سنگان استفاده شود، بهتر است این گلوله‌ها ۶ سانتیمتری باشند.
- اگر دو ترکیب اندازه گلوله قرار است استفاده شود، هر چه اختلاف اندازه آن‌ها بالاتر باشد بهتر است، یعنی ترکیب گلوله‌های ۴ سانتیمتری با گلوله‌های ۸ یا ۱۰ سانتیمتری بهتر است استفاده شود (وجود گلوله ۴ سانتیمتری الزامی است).
- اگر سه ترکیب اندازه گلوله قرار است استفاده شود، فقط ترکیب گلوله‌های درشت ۶، ۸ و ۱۰ سانتیمتری توصیه نمی‌شود، سایر ترکیب‌ها بهتر از حالت موجود جواب می‌دهند.

در کل، در آسیای گلوله‌ای شرکت آسفالت طوس سنگان که از توزیع گلوله‌های ۴ و ۶ سانتیمتری استفاده می‌شود، برای بهبود عملکرد آسیای مذکور پیشنهاد می‌شود از توزیع اندازه گلوله‌های ۴، ۶ و ۱۰ سانتیمتری استفاده شود، زیرا این توزیع علاوه بر ایجاد ارتفاع شانه بار بیشتر و مناسب‌تری ایجاد می‌کند و همچنین نسبت به توزیع‌های ۴ و ۶ سانتیمتری حدود ۳۰۰۰۰۰ گلوله کمتری مصرف می‌کند. البته برای این توزیع پیشنهاد می‌شود که سرعت-های مختلف آسیا شبیه‌سازی شود تا بهترین عملکرد آسیای گلوله‌ای در مکانیزم خردایش صورت پذیرد که این امر موضوع تحقیق آینده مولف می‌باشد. همچنین نشان داده شد که گلوله‌های سرامیکی نسبت به گلوله‌های

فولادی ارتفاع شانه بار حدود ۳۵ سانتیمتری بیشتری ایجاد می‌کند اما از آنجاییکه جرم گلوله تاثیر زیادی برای انتقال انرژی از آسیا به بار خردکننده دارد، (با توجه به تحقیقات انجام شده گلوله فولادی) گلوله سرامیکی پیشنهاد نمی‌شود، که این امر به دلیل پایین بودن چگالی گلوله‌های سرامیکی می‌باشد. همچنین نشان داده شد که بیشترین انرژی پتانسیل بار خردکننده متعلق به توزیع ۱۰ سانتیمتری به میزان $6202/25 \text{ kJ}$ و کمترین آن مربوط به توزیع گلوله ۴ سانتیمتری به میزان $1109/83 \text{ kJ}$ می‌باشد. ازسوی دیگر، بیشترین و کمترین میزان انرژی جنبشی بار خردکننده به ترتیب مربوط به اندازه گلوله ۴ سانتیمتری با $635/897 \text{ kJ}$ و توزیع اندازه گلوله‌های (۸ و ۱۰) سانتیمتری به میزان $588/42 \text{ kJ}$ می‌باشد. همچنین، نشان داده شد. که هرچه اندازه قطر بار خردکننده بزرگتر باشد، میزان انرژی پتانسیل آن بیشتر است و برعکس. همچنین هرچه اندازه قطر بار خردکننده آسیای گلوله‌ای کوچکتر باشد میزان انرژی جنبشی بار خردکننده بیشتر است و برعکس. بطور کلی بیشترین و کمترین انرژی کل بار خردکننده آسیای مذکور به ترتیب مربوط به توزیع اندازه گلوله (۴، ۶ و ۱۰) سانتیمتری به میزان $6598/4 \text{ kJ}$ و اندازه گلوله ۴ سانتیمتری به میزان $1745/73 \text{ kJ}$ می‌باشد. در نتیجه بیشترین انتقال انرژی از توان آسیای گلوله‌ای به بار خردکننده آن در توزیع اندازه گلوله‌هایی بود که بیشترین انرژی پتانسیل داشتن، مشاهده شد. و مولفان باتوجه به بیشترین ارتفاع شانه بار و بیشترین انرژی، توزیع اندازه گلوله (۴، ۶ و ۱۰) سانتیمتری را به عنوان اندازه بهینه به جای توزیع اندازه گلوله‌های ۴ و ۶ سانتیمتری که در حال حاضر در معدن سنگان استفاده می‌شود، پیشنهاد می‌کنند.

- 1- Wills, B.A., T.J. NapierMunn, 2006. Mineral Processing Technology, Elsevier Science & Technology Books.
 - 2- Remes, A., Karesvuori, J., Penkkarinen, H., Jamsa-Jounela, S-L., 2006. Integrated Approach to Monitoring and Control of Mineral Grinding Processes. Outokumpu Technology.
 - 3- Clermont, B., de Haas, B., 2010. Optimization of mill performance by using online ball and pulp measurements. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 110, 133-140.
 - 4- Napier-Munn, T.J., Morell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T, 1996. Mineral Communication Circuits. Australia: JKMRRC.
 - 5- Tangsathitkulchai, C., 2003. Effects of slurry concentration and powder filling on the net power of a laboratory ball mill. Powder Technology 137 (3), 131-138.
 - 6- Gupta, A., Yan, D.S, 2006. Introduction to Mineral Processing Design and Operation.
 - 7- Bazin, C., Obiang P, 2007. Should the slurry density in a grinding mill be adjusted as a function of grinding media size? Minerals engineering, 20, 810-815.
 - 8- Powell, M., Valery, W., 2006. Slurry pooling and transport issues in SAG mills. SAG 2006. 133-152.
- ۹- سایت مجتمع سنگ آهن سنگان خواف (www.simidco.com)
- ۱۰- مهدوی، علی. آشنایی با مجتمع مس میدوک، مرکز اسناد مجتمع مس میدوک، ۱۳۸۲
- 11- Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. Géotechnique 29, 47–65.
 - 12- Jahani, M., Farzanegan, A., Noaparast, M., 2015. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver. Powder Technol. 283, 32–47.
 - 13- Cleary, P.W., Morrison, R.B., 2008. Editorial. Miner. Eng. 21, 743.
 - 14- Cleary, P.W., 2004. Large scale industrial DEM modelling. Eng. Computation. 21, 169–204.
 - 15- Kozicki, J., Donzé, F.V., 2009. YADE-OPEN DEM: an open-source software using a discrete element method to simulate granular material. Eng. Computation. 26, 786–805.
 - 16- F. Pedrayes, J. G. Norriella, M. G. Melero, J. M. Menéndez-Aguado, J. J. Juan J. del Coz-Díaz, “Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring”power Technology , 323, 433 – 444, 2018.
 - 17- B. A. Wills, T.J., Napier-Munn, “Wills' Mineral Processing Technology”, 8th edition. Elsevier, pp. 147–180. Chapter 7, 2016.

- 18- Cleary, P.W., Morrison, R.D., 2009. Particle methods for modelling in mineral processing. *Int. J. Comput. Fluid. D.* 23, 137–146.
- 19- Ketterhagen, W.R., Am Ende, M.T., Hancock, B.C., 2009. Process Modeling in the Pharmaceutical Industry using the Discrete Element Method. *J. Pharm. Sci.* 98, 442–470.
- 20- Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., 2009b. Separation performance of double deck banana screens – Part 2: Quantitative predictions. *Miner. Eng.* 22, 1230–1244.
- 21- Chand, R., Khaskheli, M.A., Qadir, A., Ge, B., Shi, Q., 2012. Discrete particle simulation of radial segregation in horizontally rotating drum: Effects of drum-length and non-rotating end-plates. *Physica A* 391, 4590–4596.
- 22- Just, S., Toschkoff, G., Funke, A., Djuric, D., Scharrer, G., Khinast, J., Knop, K., Kleinebudde, P., 2013. Experimental Analysis of Tablet Properties for Discrete Element Modeling of an Active Coating Process. *AAPS PharmSciTech.* 14, 402–411.
- 23- Napier-Munn, T.J., Morell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T., 1996. *Mineral Communication Circuits*. Australia: JKMRRC.
- 24- Mishra, B.K., Rajamani, R.K., 1992. The discrete element method for the simulation of ball mills. *Appl. Math. Model.* 16, 598–604.
- 25- Cleary, P.W., Morrison, R.B., 2008. Editorial. *Miner. Eng.* 21, 743.
- 26- M.S. Powell, A.T. McBride, “A three-dimensional analysis of media motion and grinding regions in mills”, *Minerals Engineering*, 17, 1099–1109, 2004.
- 27- Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., 2008. DEM prediction of particle flows in grinding processes. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 58, 319–353.
- 28- Cleary, P.W., Sawley, M.L., 2002. DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge. *Appl. Math. Model.* 26, 89–111.
- 29- Mishra, B. K., Rajamani, R. K., 1993. Numerical simulation of charge motion in ball mills- lifter bar effect. *SME*.
- 30- R. D. Morrison, P. W. Cleary, “Using DEM to model ore breakage within a pilot scale SAG mill”, *Minerals Engineering* 17, 1117–1124, 2004.
- 31- M. K. Abd El-Rahman, B. K. Mishra, R. K. Rajamani, “Industrial tumbling mill power prediction using the discrete element method”, *Minerals Engineering*, 14, 1321–1328, 2001.
- 32- N. S. Weerasekara, L. X. Liu, M. S. Powell, “Estimating energy in grinding using DEM modelling”, *Minerals Engineering*, 85, 23–33, 2016.

- 33- X. Bian, G. Wang, H. Wang, S. Wang, 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*, *Minerals Engineering*, 105, 22 – 35, 2017.
- 34- Ro senkranz, S., Breitung-Faes, S., Kwade, A., 2011. Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills. *Powder. Technol.* 212, 224–230.
- 35- Balevičius, R., Džiugys, A., Kačianauskas, R., Maknickas, A., Vislavičius, K., 2006. Investigation of performance of programming approaches and languages used for numerical simulation of granular material by the discrete element method. *Comput. Phys. Commun.* 175, 404–415.
- 36- Fernandez, J.W., Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison R.D., 2011, Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens. *Miner. Eng.* 24, 741–753.
- 37- Cleary, P.W., 2010. DEM prediction of industrial and geophysical particle flows. *Particuology* 8, 106–118.
- 38- Pérez-Alonso, C., Delgadillo, J.A., 2012. Experimental validation of 2D DEM code by digital image analysis in tumbling mills. *Miner. Eng.* 25, 20–27.
- 39- Cleary, P.W., Morrisson, R., Morrell, S., 2003. Comparison of DEM and experiment for a scale model SAG mill. *Int. J. Miner. Process.* 68, 129–165.
- 40- Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., 2009a. Separation performance of double deck banana screens – Part 1: Flow and separation for different accelerations. *Miner. Eng.* 22, 1218–1229.
- 41- Vu-Quoc, L., Zhang, X., Walton, O.R., 2000, A 3-D discrete-element method for dry granular flows of ellipsoidal particles. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 187, 483–528.
- 42- Cleary, P.W., Morrison, R.D., 2011. Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill using DEM. *Miner. Eng.* 24, 352–366.
- 43- Djordjevic, N., Morrison, R., Loveday, B., Cleary, P., 2006. Modelling comminution patterns within a pilot scale AG/SAG mill. *Miner. Eng.* 19, 1505–1516.
- 44- Farzanegan, A., Arabzadeh, B., Hasanzadeh, V., 2012. Back-calculation of mechanical parameters of shell and balls materials from DEM simulations. *Journal of Mining & Environment* 3, 33– 40.
- 45- Ghasemi, A., Musavi, S. O., Banisi, S., 2014b. Effect of time step on the accuracy of DEM calculations. In: XXVII International Mineral Processing Congress (IMPC), Santiago, Chile, 1–10.

۴۶- قاسمی، علیرضا، موسوی، سید امید، بنیسی، صمد، ۲۰۱۳. تأثیر گام زمانی بر دقت نتایج در شبیه سازی حرکت ذرات به روش اجزای گسسته (راگ). نشریه علمی-پژوهشی روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، یزد، ایران، شماره ۶، ۲۳-۳۲.

۴۷- نژادآریا، میلاد، قاسمی، علیرضا، بنیسی، صمد، ۲۰۱۳. دو الگوریتم تشخیص برخورد ذرات در شبیه سازی با روش اجزای گسسته (راگ). نهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن ایران، دانشگاه بیرجند، ایران، ۱۱-۲.

۴۸- قاسمی، علیرضا، موسوی، سید امید، بنیسی، صمد، ۲۰۱۴. اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی حرکت بار در آسیاهای گردان به روش اجزای گسسته با نرم افزار KMPC_{DEM}. پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، مصلی امام خمینی تهران، تهران، ایران، ۹۳۱-۹۳۶.

49- Ghasemi, A., Musavi, S. O., Banisi, S., 2014b. Effect of time step on the accuracy of DEM calculations. In: XXVII International Mineral Processing Congress (IMPC), Santiago, Chile, 1-10.

۵۰- پنجی پور، رسول، ۲۰۱۶. بررسی تاثیر دانه بندی گلوله ها بر روی شکل بار و انرژی مصرفی در آسیا گلوله ای با استفاده از شبیه سازی سه بعدی به روش المان گسسته (DEM). دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری معدن دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

51- Rodriguez, V.A., de Carvalho, R.M., Tavares, L.M., 2018. Insights into advanced ball mill modelling through discrete element simulations. Miner. Eng. 127, 48-60.

52- R. Venugopal, R.K.Rajamani, 2000. 3D simulation of charge motion in tumbling mills by discrete element method. Powder Technology, 115, 157-166.

53- Mishra, B. K., Rajamani, R. K., 1993. Numerical simulation of chrage motion in ball mills- lifter bar effect. SME.

54- Hlungwani, O., Rikhotso, J., Dong, H., Moys, M. H., 2003. Further validtaion of DEM modeling of milling: effect of liner profile and mill speed. Minerals Engineering, 993-998.

55- Djordjevic, N., 2003. Discrete element modelling of the influence of lifter on power draw of tumbling mills. Minerals Engineering, 331-336.

56- Djordjevic, N., Shi, F. N., Morrison, R., 2004. Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM. Minerals Engineering, 1135-1142.

57- Royston, D., 2003. A review of recent experience with large-angle wide-spaced shell lifter liners. SME.

- 58- Kloss, C., Goniva, C., Aichinger, G., Pirker, Stefan, 2009. Comprehensive DEM-DPM-CFD simulations—model synthesis, experimental validation and scalability. In: Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia.
- 59- Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., Amberger, S., Pirker, S., 2012. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. *Prog. Comput. Fluid Dy.* 12, 140–152.
- 60- Kloss, C., Goniva, C., 2011. LIGGGHTS—open source discrete element simulations of granular materials based on LAMMPS. *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)* 2, 781–788.
- 61- Li, J., Webb, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M., 2002. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening—effect of particle bed depth. *Trans IChemE* 80, 109–117.
- 62- Li, J., Webb, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M., 2003. Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technol.* 133, 190–202.
- 63- Dong, K.J., Yu, A.B., Brake, I., 2009. DEM simulation of particle flow on a multi-deck banana screen. *Miner. Eng.* 22, 910–920.
- 64- Dong, K.J., Yu, A.B., 2012. Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination. *Miner. Eng.* 31, 2–9.
- 65- Varga, M., Goniva, C., Adam, K., Badisch, E., 2013. Combined experimental and numerical approach for wear prediction in feed pipes. *Tribol. Int.* 65, 200–206.

پیوست الف

فایل ورودی (input) شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای با گلوله سرامیکی

```
#Ball mill of Sangan Asphalt Tous Company
#time=13 s

atom_style granular
atom_modify      map array
boundary         f f f
newton           off

communicate       single vel yes
units            si

region            reg block -0.05 5.63 -0.05 5.63 -0.05 11.25 units box
create_box 1 reg

neighbor 1e-3 bin
neigh_modify      delay 0

#Material properties
fix              m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1e9
fix              m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.21
fix              m3 all property/global coefficientRestitution
peratomtypepair 1 0.75
fix              m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair
1 0.17
fix              m5 all property/global coefficientRollingFriction
peratomtypepair 1 0.02 # The optional rolling friction model is
activated via rolling_friction = 'cdt'

#New pair style
```

```

pair_style      gran model hertz tangential history #Hertzian without
cohesion
pair_coeff      * *

timestep      0.0001

fix           1 all nve/sphere
fix           2 all gravity 9.81 vector 0.0 -1.0 0.0

#box walls
fix           boxwalls_x1 all wall/gran model hertz tangential
history primitive type 1 xplane -0.01
fix           boxwalls_x2 all wall/gran model hertz tangential
history primitive type 1 xplane 5.59
fix           boxwalls_y1 all wall/gran model hertz tangential
history primitive type 1 yplane -0.01
fix           boxwalls_y2 all wall/gran model hertz tangential
history primitive type 1 yplane 5.59
fix           boxwalls_z1 all wall/gran model hertz tangential
history primitive type 1 zplane -0.01
fix           boxwalls_z2 all wall/gran model hertz tangential
history primitive type 1 zplane 11.21

#import mesh from meshes:
fix           cad all mesh/surface file ballmill.stl type 1 rotate axis
0. 0. 1. angle 0 move 0 0 0 scale 1
fix           inface all mesh/surface file insertion_face.stl type 1

#use the imported mesh as granular wall
fix           ballmill_wall all wall/gran model hertz tangential
history mesh n_meshes 1 meshes cad

#distributions for insertion

```

```

fix          pts1 all particletemplate/sphere 15485867 atom_type 1
density constant 3900 radius constant 0.05
fix          pts2 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1
density constant 3900 radius constant 0.04
fix          pts3 all particletemplate/sphere 32452843 atom_type 1
density constant 3900 radius constant 0.03
fix          pdd1 all particledistribution/discrete 86028121 3 pts1
0.25 pts2 0.375 pts3 0.375

#region for insertion
group      nve_group region reg
region      bc block 1 4.5 3.2 5 0.15 1.1 units box

#particle insertion
fix          ins nve_group insert/stream seed 86028157
distributiontemplate pdd1 maxattempt 100 mass 11645.97 massrate
11645.97 overlapcheck yes vel constant 0.0 -1.0 0.0 insertion_face
inface extrude_length 1

#apply nve integration to all particles that are inserted as single
particles
fix integr nve_group nve/sphere

#thermo settings
compute      1 all erotate/sphere
thermo_style  custom step atoms ke c_1 vol
thermo       1000
thermo_modify lost ignore norm no
compute_modify thermo_temp dynamic yes

#insert the first particles so that dump is not empty
run          100000

```

```
dump    dmp all custom 500 post/dump.ballmill id type type x y z ix iy
iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump    dumpstress all mesh/stl 500 post/mesh_*.stl

#insert particles
run      100000 upto
unfix      ins

#moving mesh
fix      movecad all move/mesh mesh cad rotate origin 2.79 2.79
0.0 axis 0. 0. -1. period 3.2

#run
run      150000 upto
```

Abstract

It is important to reach the particles to the right degree of Liberation in mineral processing plants, which is done by several stages of crushing and grinding. Ball mills are usually placed in the last stage of the comminution circuit and play the most important role in this regard. The two main mechanisms of comminution in tumbling mills are impact and abrasion. In order to improve the performance of ball mills, it is necessary to make the role of the impact mechanism more prominent and the role of the abrasion mechanism less important. This is possible by creating the right shoulder and toe points and by finding the right distribution of ball combinations for the crushing load. The aim of the present study is to simulate and optimize the ball mills of the comminution circuits of the Sangani Khaf Tus Asphalt Processing Plant with LIGGGHTS software. Its crushing circuit consists of dry grinding (HPGR) and two parallel closed-circuit ball mills with a set of hydro cyclones. Regarding that ball mill plays a key role in the overall efficiency of the process, its simulation and optimization are of particular importance. The results showed that the maximum shoulder height was 478.75 cm, created by the distribution of 4, 6, 8 cm of balls, which compared to the shoulder height 461.79 cm created by the distribution of the 4 and 6 cm of balls, currently used in the ball mill of the Tus Asphalt Company was about 17.79 cm higher. Therefore, it is suggested that this new combination be used to improve the performance of the ball mill of this company instead of using the present combination. Also, grinding media energy of the ball mill of this company mill was investigated and the effect of fifteen different size distributions of the combination of the 4, 6, 8, and 10 cm balls on grinding media energy (sum of kinetic and potential energies of all balls) in the ball mill of Sangani mine using discrete element method (DEM) has been investigated. The results showed that the lowest amount of energy transferred from the mill to the grinding media was related to the 4 cm distribution by amount of 1745.726 kJ. Also, the highest amounts of energy transferred from the mill to the grinding media were respectively related to the 10 cm distribution by amount of 6791.432 kJ and the 4, 6 and 10 cm distribution by amount of 6598.39 kJ and the distribution (4 and 6) cm by amount of 6576.04 kJ. As a result, instead of 4 and 6 cm balls that receive about 2830.546 kJ energy from the mill and are currently used in the Sangani mine, the (4, 6, 10) cm distribution can be used because of maximum load height and energy, and in this way the performance of the ball mill will be improved. Also, in order to investigate the effect of the type of balls, the optimal state simulation, i.e. the combination of 4, 6

and 10 cm balls for ceramic balls was performed. The results showed that ceramic balls, while produce a higher shoulder height, but will produce much less grinding media energy (3196.74 kJ) than steel balls (6598.397 kJ). Therefore, it is recommended to use steel balls in Sangam mine.

Keywords: Comminution mechanism; Ball mill; Ball size distribution; Discrete Element Method; Charge shoulder height



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Processing

**Effect of ball size distribution on comminution mechanism – case
study: ball mill of Sangam Asphalt Touse Company**

By: Iman Fahimi Khoyardi

Supervisor:

Dr. M. Jahani Chegeni

Advisor:

Dr. A. Azizi

July 2020