بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

بخش مهندسی معدن

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی رشته مهندسی معدن

گرایش فرآوری مواد

بررسی شکل و مسیر حرکت بار در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن

مطالعه موردی: شرکت معدنی و صنعتی گل گهر

مؤلف:

مصطفی مالکی مقدم

استاد راهنما:

دکتر صمد بنیسی

تیر ماه ۱۳۹۲

این پایان‌نامه به عنوان یکی از شرایط درجه‌ی کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی معدن

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره‌ی مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو:

استاد راهنما:

داور ۱:

داور ۲:

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی دانشکده در جلسه‌ی دفاع:

معاون آموزشی و پژوهشی دانشکده:

حق چاپ محفوظ و مربوط به دانشگاه شهید باهنر کرمان می‌باشد.

تقدیم به

ساحت مقدس بقیهٔ الله الاعظم

حضرت مهدی صاحب الزمان (عج)،

آن آیینه خدایی که برافراشتن پرچم هدایتش را چشم به راهیم

تشکر و قدردانی

یگانه پروردگار هستی را سپاس می‌گویم، که مرا توفیق عطا فرمود تا این مجموعه مختصر را تقدیم دارم. از آنجا که او نیز شکر خود را منوط به تشکر از خلق می‌داند، بر خود می‌دانم از همه‌ی عزیزانی که بنده را در انجام این پروژه یاری نمودند، قدردانی نمایم. باشد که این کار توشه‌ای برای زندگانی ابدی همه‌ی ما گردد.

بدینوسیله، به رسم تواضع و ادب از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر صمد بنیسی که به شاگردانش درس زندگی و تلاش، جهت اعتلای ایران عزیز اسلامی را می‌آموزد و راهنمایی‌های ارزنده ایشان راه‌گشای انجام این پژوهش بود، کمال تشکر را دارم. از زحمات بی دریغ و راهنمایی های کلیه اساتید محترم دوران تحصیل، بسیار سپاسگزارم. از دوستان عزیزم آقایان دکتر یحیایی که مقدمات اجرای این تحقیق، حاصل زحمات او بود، مهندس پارساپور، مهندس ارغوانی، مهندس حسامی و سایر دوستان در مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر که همکاری و مشورت آنها راهگشای مشکلات این پژوهش بود تشکر می کنم. از مدیران و پرسنل محترم شرکت های معدنی و صنعتی گل گهر و گهرروش سیرجان؛ به ویژه آقایان مهندس جلال مآب، مهندس خلیلی، مهندس حسنی، مهندس رفیع زاده، مهندس حجتی، مهندس قربان نژاد، مهندس موسوی، مهندس حاجی‌زاده و سایر پرسنل محترمی که همکاری ایشان باعث پیشبرد اهداف این پژوهش صنعتی گردید، صمیمانه تشکر می‌کنم.

در نهایت از همسر عزیزم که حضور کمرنگ مرا در زندگی با صبر، مهربانی و یکدلی جبران می‌کرد و همراه همیشه ام بود و همچنین خانواده عزیزم که جز زحمت چیزی برایشان نداشتم، کمال تشکر را دارم.

چکیده

امروزه با جایگزینی آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن به جای چند مرحله عملیات سنگ‌شکنی و آسیاکنی، بخش عمده‌ای از هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی در کارخانه‌های فرآوری حذف شده است. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کارآیی این آسیاها، حرکت بار است. از آنجا که مشاهده مستقیم شکل بار و مسیر حرکت آن در آسیاهای صنعتی امکان‌پذیر نیست، ترکیبی از روش‌های فیزیکی و تحلیلی برای تعیین شکل بار استفاده شد. بسته‌های نرم‌افزاری تعیین مسیر حرکت بار مانند GMT[1]، تنها مسیر تک گلوله را درنظر می‌گیرند و از تأثیر بار و برهم‌کنش میان ذرات چشم پوشی می‌کنند. در این تحقیق، مسیر اندازه‌گیری شده حرکت بار در یک آسیای مدل با قطر ۱۰۰ سانتی‌متر و طول متغیر از ۳/۶ تا ۲۱/۶ سانتی‌متر، با نتایج حاصل از نرم‌افزار GMT مقایسه شد. آزمایش ها نشان داد تأثیر دیواره بر مسیر حرکت بار در آسیای با طول ۱۰/۸ سانتی متر قابل صرف نظر کردن است. آزمایش‌های مسیر حرکت بار، با استفاده از چهار نوع آستر کوچک مقیاس شده آسیاهای شرکت معدنی و صنعتی گل گهر و مس سرچشمه با مقیاس ۱ به ۱۰ و ۱ به ۹ انجام شدند. موقعیت زاویه‌ای پاشنه، شانه و نقطه برخورد بار با استفاده از دوربین سرعت بالا و از طریق دیواره شفاف آسیا در سرعت‌های ۵۵، ۷۰ و ۸۵٪ سرعت بحرانی و در پرشدگی‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ اندازه‌گیری شدند. روابط تجربی تصحیح شکل و مسیر بار با تحلیل تصاویر بدست‌آمد. اعتبار سنجی روابط با استفاده از مدل آستر پیشنهادی آسیای گل گهر انجام شد. خطای نسبی تعیین موقعیت های شانه، پاشنه، نقطه عزیمت پاشنه و نقطه برخورد بار به ترتیب برابر؛ ۵، ۰/۷، ۲ و ۰/۲٪ بدست آمد. نتایج نشان داد با افزایش زاویه بالابر آستر آسیای خودشکن گل‌گهر از ۷ به ۳۰ درجه، اختلاف نقطه برخورد بار و پاشنه از ۴۰/۱ به ۱۱/۲ درجه کاهش یافت و مسیر مناسب حرکت بار را فراهم نمود. پس از نصب آستر با زاویه ۳۰ درجه در یکی از آسیاهای خودشکن این شرکت، تبدیل آن به نیمه‌خودشکن با اضافه کردن ۴٪ گلوله انجام شد. با تبدیل آسیای خودشکن به نیمه‌خودشکن، ظرفیت آسیا ۳۱٪ (از ۴۱۹ به ۵۴۸ تن بر ساعت) افزایش یافت و P_{80} (اندازه ۸۰٪ عبوری) آن از ۵۱۶ به ۴۹۶ میکرون کاهش یافت که نشان دهنده بهبود کارایی خردایش در این آسیا بود.

کلمات کلیدی: خردایش، آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن، شکل بار، نقطه برخورد بار.

[1] Grinding Media Trajectory

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱
۱-۱- عوامل مؤثر در مسیر حرکت بار و کارآیی آسیاکنی..... ۳
۱-۱-۲- طرح آستر و مکانیزم خردایش..... ۳
۱-۱-۳- عوامل عملیاتی..... ۶
۱-۲- ضرورت انجام تحقیق..... ۷
۱-۲-۱- آسیاهای شرکت معدنی و صنعتی گل گهر..... ۸
فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده ۱۰
۲-۱- شکل و مسیر حرکت بار در آسیاهای گردان..... ۱۱
۲-۱-۱- بررسی های آزمایشگاهی..... ۱۶
۲-۱-۲- شبیه‌سازی عددی..... ۱۸
۲-۲- نحوه سایش آستر و ارتباط آن با الگوی حرکت بار..... ۲۴
فصل سوم: ابزار و روش تحقیق ۲۹
۳-۱- ابزار تحقیق..... ۳۰
۳-۱-۱- نرم‌افزار تعیین مسیر حرکت بار..... ۳۰
۳-۱-۲- آسیای مدل..... ۳۲
۳-۲- طراحی آستر مناسب برای آسیای نیمه‌خودشکن..... ۳۶
۳-۲-۱- شبیه سازی مسیر حرکت گلوله در آسیاهای گل گهر با استفاده از آسترهای مختلف..... ۳۷
۳-۲-۲- تعیین بازه‌ی ایمن..... ۳۸
۳-۳- بدست آوردن روابط تعیین کننده شکل بار و اصلاح مسیر حرکت..... ۳۸

فصل چهارم: ارائه یافته ها و تحلیل نتایج ۴۰
۴-۱- مسیر حرکت بار در نرم افزار GMT..... ۴۱
۴-۱-۱- مسیر حرکت بار در آسیا با آستر قدیم آسیای خودشکن گل گهر..... ۴۲
۴-۱-۲- تعیین مسیر مناسب حرکت بار جهت تبدیل آسیای خودشکن گل گهر به نیمه خودشکن..... ۴۳
۴-۱-۳- بازه ایمن..... ۴۴
۴-۱-۴- مسیر حرکت بار در آسیای مدل دو بعدی..... ۴۵
۴-۲- ارائه روابط تعیین کننده شکل و تصحیح مسیر حرکت بار..... ۴۷
۴-۲-۱- ارائه شکل جدید بار..... ۴۷
۴-۲-۲- موقعیت پاشنه..... ۴۸
۴-۲-۳- نقطه عزیمت پاشنه..... ۵۰
۴-۲-۴- موقعیت شانه..... ۵۱
۴-۲-۵- نقطه برخورد بار..... ۵۲
۴-۲-۶- شعاع داخلی بار..... ۵۴
۴-۲-۷- اعتبارسنجی روابط..... ۵۴
۴-۳- تبدیل آسیای خودشکن به نیمه‌خودشکن و تأثیر آن بر کارایی خردایش..... ۵۷
۴-۳-۱- تصحیح بازه ایمن..... ۵۷
۴- ۳-۲- تبدیل آسیای خودشکن به نیمه‌خودشکن..... ۵۸
۴-۳-۳- تاثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد آسیای نیمه خودشکن..... ۶۱
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۶۴
۵-۱- نتیجه گیری..... ۶۵
۵-۱-۱- اصلاح شکل و مسیر حرکت بار..... ۶۵

۵-۱-۲- کاربرد صنعتی نتایج ۶۶
۵-۱-۳- نوآوری های تحقیق انجام شده ۶۷
۵-۲- پیشنهادها ۶۷
منابع ۶۸
پیوست ۱ ..... ۷۲
پ-۱- نحوه بدست آوردن روابط تعیین کننده شکل و مسیر حرکت بار ۷۴
پ۱-۱- موقعیت پاشنه ۷۴
پ-۱-۲- نقطه عزیمت پاشنه ۷۶
پ-۱-۳- موقعیت شانه ۷۷
پ-۱-۴- شعاع داخلی بار ۷۸

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱- الگوی جریان در آسیا در سرعت‌های دوران مختلف با آسترهای نو و ساییده شده.... ۵
شکل ۲-۱- شکل ساده شده بار در داخل آسیا..... ۱۱
شکل ۲-۲- الگوی کلی از تقسیم‌بندی بار توسط Liddell..... ۱۲
شکل ۲-۳- شکل ساده شده بار در داخل آسیا..... ۱۴
شکل ۲-۴- پاسخ کرنش سنج‌های نصب شده در طول یک دور چرخش آسیا..... ۱۷
شکل ۲-۵- حسگرهای مجاورتی القایی..... ۱۷
شکل ۲-۶- رفتار بار آسیا در پرشدگی ۳۰٪ و سرعت ۸۰٪ بحرانی a) یک نمونه از عکس دیجیتالی شده، b) نمونه کامل دیجیتالی شده، c) عکس واقعی از آسیا..... ۱۹
شکل ۲-۷- مدل‌سازی نحوه حرکت بار در داخل آسیا برای سه طرح مختلف بالابر (a- دندانه‌ای، b- موجی و c- مستطیلی) ۲۰
شکل ۲-۸- شکل های مختلف بار در ارتفاع های متفاوت بالابر..... ۲۲
شکل ۲-۹- تصویر لحظه ای از شرایط تنش در آستر آسیا..... ۲۳
شکل ۲-۱۰- نحوه انجام آزمایش‌ها..... ۲۴
شکل ۲-۱۱- تجهیزات اندازه‌گیری ضخامت آستر..... ۲۵
شکل ۲-۱۲- تجهیزات الکترونیکی اندازه‌گیری سایش آستر ۲۵
شکل ۲-۱۳- ابزار اندازه‌گیری الگوی سایش آستر..... ۲۶
شکل ۲-۱۴- طرح سه بعدی آستر ساییده شده بعد از ۵۳۸۴ ساعت کار..... ۲۶
شکل ۲-۱۵- (a) دستگاه اسکن کننده لیزری و (b) مدل سه بعدی آسترهای دیواره و سر ورودی آسیا بدست آمده با استفاده از داده های MillMapper..... ۲۸
شکل ۳-۱- بخش ورود اطلاعات در برنامه GMT..... ۳۱
شکل ۳-۲- بخش نمایش نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار GMT..... ۳۲
شکل ۳-۳-(a) نمونه مدل تهیه شده از آستر نو (b) مقطع ششم از آستر کارکرده آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه بعد از ۵۱۸۴ ساعت..... ۳۴

شکل ۳-۴- آسیای مدل مورد استفاده در تحقیق..... ۳۴
شکل ۳-۵- a) نمایی از یک قطعه ۳/۶ سانتی متری مدل آستر شماره ۳ b) آسیای با طول ۱۰/۸ سانتی متری..... ۳۵
شکل ۳-۶- طرح مدل دو بعدی آسیای نیمه‌خودشکن..... ۳۶
شکل ۳-۷- طرح مدل سه بعدی آسیای نیمه‌خودشکن..... ۳۶
شکل ۴-۱- شبیه‌سازی مسیر حرکت گلوله‌های ۱۲۰ میلیمتری برای طرح آستر موجود با پرشدگی ۲۴٪..... ۴۲
شکل ۴-۲- تاثیر زاویه‌ی صفحه‌ی بالابر بر مسیر حرکت بار در آسیا (پرشدگی کلی ۲۴٪)..... ۴۳
شکل ۴-۳- مقایسه‌ی طرح آستر پیشنهادی با طرح آستر قدیم..... ۴۵
شکل ۴-۴- مقایسه‌ی شکل و مسیر بار برای دو طرح آستر قدیم و پیشنهادی در پرشدگی ۲۰٪.. ۴۶
شکل ۴-۵- (a) شکل و مسیر حرکت بار پیش بینی شده توسط نرم افزار GMT در مقایسه با واقعیت (b) شکل و مسیر بار پیشنهادی (آستر شماره ۱، سرعت ۸۵٪ بحرانی، پرشدگی ۲۰٪)..... ۴۸
شکل ۴-۶- تغییر در موقعیت پاشنه با تغییر نوع آستر، سرعت و پرشدگی (a): ۸۵٪ سرعت بحرانی (b): ۵۵٪ سرعت بحرانی..... ۴۹
شکل ۴-۷- تغییر در موقعیت زاویه‌ای شانه با تغییر نوع آستر، پرشدگی و سرعت، (a): ۸۵٪ سرعت بحرانی، (b): ۵۵٪ سرعت بحرانی..... ۵۱
شکل ۴-۸- اختلاف در نقطه برخورد مشاهده شده بار و پیش‌بینی شده توسط GMT، ۸۵٪ سرعت بحرانی..... ۵۳
شکل ۴-۹- مقادیر اندازه‌گیری و پیش بینی شده زاویه شانه بار..... ۵۵
شکل ۴-۱۰- مقادیر اندازه‌گیری و پیش بینی شده زاویه پاشنه بار..... ۵۶
شکل ۴-۱۱- مقادیر اندازه‌گیری و پیش بینی شده نقطه برخورد بار..... ۵۶
شکل ۴-۱۲- مقایسه شکل و مسیر پیش‌بینی و مشاهده شده بار (آستر شماره ۳)، (a)، (b) و (c): ۱۵٪ پرشدگی در آسیای با طول ۱۰/۸ سانتی متر و سرعت های به‌ترتیب ۸۵، ۷۰ و ۵۵٪ سرعت بحرانی، (d)، (e) و (f): ۱۵٪ پرشدگی در آسیای با طول ۲۱/۶ سانتی متر و سرعت های به‌ترتیب

۸۵، ۷۰ و ۵۵٪ سرعت بحرانی. (S: شانه بار، T: پاشنه بار، TD: نقطه عزیمت پاشنه و IP: نقطه برخورد بار)..... ۵۷
شکل ۴-۱۳- (a) شکل و مسیر حرکت بار پیش بینی شده توسط نرم افزار GMT در مقایسه با واقعیت (b) شکل و مسیر بار اصلاح شده با روابط جدید (آستر شماره ۳، سرعت ۸۵٪ بحرانی، پرشدگی ۳۰٪)..... ۶۰
شکل ۴-۱۴- روند افزایش ظرفیت ورودی به آسیا با تغییر طرح آستر و اضافه شدن گلوله..... ۶۱
شکل ۴-۱۵- P_{80} آسیای نیمه خودشکن در توان های مختلف مکنده..... ۶۲
شکل ۴-۱۶- P_{80} آسیای نیمه خودشکن در مقدارهای مختلف خوراک ورودی..... ۶۳
شکل پ-۱- تقسیم بار به دو بخش..... ۷۸

فهرست جداول

جدول ۳-۱- مشخصات آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه..... ۳۲
جدول ۳-۲- مشخصات آسیاهای خشک مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر..... ۳۲
جدول ۳-۳- خصوصیات ۴ آستر صنعتی مورد استفاده..... ۳۳
جدول ۴-۱- فاصله بین محل برخورد گلوله‌ها با پاشنه‌ی بار در پرشدگی‌های مختلف برای آستر فعلی..... ۴۳
جدول ۴-۲- خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی مسیر حرکت گلوله برای آسیاهای صنعتی..... ۴۵
جدول ۴-۳- تغییرات فاصله‌ی بین محل برخورد گلوله به دیواره با پاشنه‌ی بار (استفاده ازآستر پیشنهادی)..... ۴۷
جدول ۴-۴- خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی مسیر حرکت گلوله در آسیاهای صنعتی با استفاده از روابط جدید تعیین کننده شکل و نقطه برخورد بار..... ۵۹
جدول ۴-۵- ابعاد و مقدار گلوله مورد نیاز برای تأمین پرشدگی ۴٪..... ۶۰
جدول ۴-۶- تناژ واندازه محصول آسیا قبل و بعد از اضافه کردن گلوله..... ۶۱

فصل اول

مقدمه

دستگاه خردایش وسیله ای برای تبدیل انرژی به حرکت مکانیکی است. این حرکت به بار درون آسیا منتقل می‌شود و اعمال عملیات مکانیکی روی ذرات منجر به ضربه خوردن و خردایش آنها می‌شود (Powell and McBride, 2006). در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، آسیاکنی بیشترین سهم مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای را دارد و کمتر از ۵٪ از این انرژی صرف خرد کردن مواد می‌شود. آسیاهای گردان بخش مهمی از تجهیزات خردایش هستند که برای کاهش ابعاد مواد ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از تجهیزات بزرگ به جای مجموعه‌ای از تجهیزات کوچک، رویکرد غالب در صنعت فرآوری مواد معدنی بوده است. به همین دلیل در اغلب کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی از آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن به‌جای چند مرحله سنگ‌شکنی و آسیاکنی استفاده می‌شود.

فهم بهتر سازوکار انرژی مصرفی و رفتار بار درون آسیا می‌تواند منجر به صرفه جویی چشمگیری در انرژی مصرفی شود (Hossaini et al., 2011). با درک بهتر رفتار بار می‌توان با تغییر عواملی مانند سرعت و طرح آستر، ظرفیت خردایش و کارایی آسیاکنی را افزایش داد و کنترل آسیا را آسان تر نمود. در دهه گذشته، تحقیقات زیادی در جهت مطالعه اثر رفتار بار در بهبود کارایی آسیاکنی انجام شده است (Davis, 1919; Mishra and Rajamani, 1990; McElroy et al., 2009; Pérez and Delgadillo, 2012).

در اغلب رویکردهای کنترلی، توان‌کشی در آسیاها به‌عنوان یک متغیر کنترل شونده مورد توجه بوده است، اما به دلیل روابط پیچیده و غیر خطی آن با عوامل عملیاتی، غیرواقعی بودن شکل بار و در نظر نگرفتن تمام عوامل تأثیر گذار بر حرکت بار، امکان استفاده مناسب از این عامل، در کنترل آسیاهای صنعتی فراهم نشده است. این مسئله در مورد آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن به دلیل وابستگی بیشتر کارآیی آسیاکنی به مشخصات خوراک ورودی، بسیار پیچیده‌تر از آسیاهای گلوله‌ای می‌باشد. به همین دلیل، بخش عمده‌ای از تلاش‌های انجام شده در چند دهه‌ی اخیر در زمینه خردایش، متوجه مدل‌سازی آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن گردد (Austin, 1990; Mishra and Rajamani, 1990; Morrell, 2004; Djordjevic et al., 2006; Kalala et al., 2008; Khanal and Morrison, 2008; Powell et al., 2008; Apelt and Tornhill, 2009).

متاسفانه هیچ یک از روابط ارائه شده، قابلیت کاربرد در همه محدوده‌های شرایط عملیاتی معمول در صنعت را ندارد. دلیل اصلی این مسئله در ساده‌سازی شرایط دینامیکی بار داخل آسیا است. عوامل مختلفی بر شکل و دینامیک بار داخل آسیا تاثیر می‌گذارند که به طور کلی می‌توان آنها را به دو دسته‌ی عوامل طراحی (از جمله ابعاد آسیا و طرح آستر) و عوامل عملیاتی (از جمله سرعت دوران، حجم بار، خصوصیات رئولوژیکی پالپ و خصوصیات سنگ معدن ورودی) تقسیم کرد. از میان این عوامل، آستر آسیا به دلیل اینکه به طور مستقیم با بار داخل آسیا در ارتباط می‌باشد و در طی زمان کارکرد آسیا به دلیل سایش تغییر شکل می‌دهد، دارای اهمیت ویژه‌ای است.

۱-۱- عوامل مؤثر در مسیر حرکت بار و کارآیی آسیاکنی

در آسیاهای گردان، انرژی وارد شده از موتور به آسیا (به جز بخش‌هایی که به صورت‌های مختلف تلف می‌شود) صرف حرکت بار می‌شود. در این میان، آستر آسیا عامل انتقال انرژی وارد شده به مواد داخل آسیا می‌باشد و تاثیر قابل توجهی بر رفتار بار داخل آسیا دارد. به همین دلیل، بررسی نقش آستر بر الگوی حرکت بار در داخل آسیا موضوع تحقیقات زیادی بوده است (McIvor,1983; Vermeulen and Howat, 1986; Powell, 1991; Mishra and Rajamani, 1993; Moys, 1993; Cleary, 2001; Rajamani et al., 2002; Djordjevic et al., 2004; Kalala et al., 2005; Makokha and Moys, 2006; Kalala et al., 2008).

۱-۱-۲- طرح آستر و مکانیزم خردایش

مسیر حرکت بار در آسیاهایی که از نظر مشخصات ابعادی و شرایط عملیاتی یکسان، ولی دارای بالابرهایی با الگوی متفاوت بوده‌اند، متفاوت گزارش شده که به معنای تحت تاثیر قرار گرفتن سازوکار خردایش در آنها است. آسترهای بدون بالابر، میزان سایش در آسیا را افزایش داده و در نتیجه محصول ریزتری تولید می‌کنند. وجود بالابر در آسیا، موجب سقوط بار از ارتفاع بالاتر شده و با غالب شدن سازوکار ضربه در داخل آسیا، محصول درشت‌تری تولید می‌شود (Wills, 2007).

طرح آستر در کارآیی آسیاکنی و توان‌کشی در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن در مقایسه با آسیاهای گلوله‌ای دارای اهمیت بیشتری است. دلیل این موضوع، سهم بالا و تقریباً ثابت گلوله در آسیاهای گلوله‌ای به سنگ معدن است که موجب پایداری شرایط آسیاکنی و توان‌کشی در مقابل

تغییر در شرایط عملیاتی می‌گردد. در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن به دلیل اینکه میزان بار داخل آسیا به شدت تحت تاثیر خصوصیات سنگ معدن و شرایط دینامیکی بار می‌باشد، شرایط آسیاکنی و توان‌کشی تحت تاثیر این تغییرات، به طور محسوس دچار نوسان می‌شوند.

با توجه به شرایط عملیاتی و به‌خصوص طرح بالابر، چهار الگوی مسیر حرکت بار را می‌توان در آسیا مشاهده کرد که عبارتند از غلتیدن، آبشاری کوچک، آبشاری بزرگ و سانتریفیوژ شدن (Yang, et al., 2008). در شکل ۱-۱، الگوی جریان در داخل یک آسیای آزمایشگاهی (قطر ۱ متر) برای دو آستر نو و ساییده شده در سه سرعت دوران مختلف با یکدیگر مقایسه شده است (یحیایی و بنیسی، ۱۳۹۰).

وقتی سرعت دوران ۴۶٪ سرعت بحرانی است، سطح بار به صورت منحنی در آمده و یک لایه ضخیم از ذرات با سرعت حرکت زیاد بوجود می‌آید (شکل ۱-۱). در این وضعیت بار در حال تغییر از غلتیدن به آبشاری کوچک است. در آسترهای ساییده شده ذرات کمی هستند که جدا از بدنه‌ی بار حرکت می‌کنند در حالی‌که در آسترهای نو، بعضی از ذرات بدنه بار را برای مدت کوتاهی ترک کرده و وارد حرکت پرتابی می‌شوند. در این وضعیت سازوکار اصلی خردایش، سایش است. در آسترهای نو، ذراتی که حرکت آبشاری کوچک دارند، موجب شکست ضربه‌ای با انرژی کم می‌شوند (یحیایی و بنیسی، ۱۳۹۰).

وقتی سرعت آسیا به ۶۹٪ سرعت بحرانی افزایش می‌یابد، الگوی جریان به‌طور کامل تبدیل به حرکت آبشاری کوچک می‌شود که با سطح S شکل بار، موقعیت بالاتر شانه بار و بخش بیشتری از بار که جدا از بدنه‌ی بار حرکت می‌کنند شناخته می‌شود. در مورد آسترهای نو، بخش کوچکی از بار وارد حرکت آبشاری بزرگ می‌شود. در این الگوی حرکت بار، سهم شکست ناشی از ضربه به تدریج افزایش پیدا می‌کند که محصولی با دامنه ابعاد وسیع تولید می‌کند. در مورد آسترهای نو، وجود حرکت آبشاری بزرگ موجب شکست ضربه‌ای با انرژی بالا می‌شود.

شکل ۱-۱- الگوی جریان در آسیا در سرعت‌های دوران مختلف با آستر‌های نو و ساییده شده (یحیایی و بنیسی، ۱۳۹۰)

در الگوی حرکت آبشاری بزرگ که در سرعت ۹۲٪ سرعت بحرانی اتفاق می‌افتد، ذرات دارای انرژی کافی هستند که از بستر بار جدا شده و به فضای وسط آسیا وارد شوند که خصوصیت اصلی الگوی حرکت آبشاری بزرگ است. در آستر‌های نو، تعدادی از ذرات هستند که سانتریفیوژ می‌شوند. در این الگوی حرکت بار، شکست ضربه‌ای با انرژی بالا غالب است و ذرات به

اندازه‌های نسبتاً بزرگ و مقدار بسیار کمی ذرات نرمه، شکسته می‌شوند و نرخ شکست‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند (یحیایی و بنیسی، ۱۳۹۰).

هدف طراحی آستر در دو دهه اخیر، بهبود کارآیی آسیاکنی از طریق تغییر در زاویه صفحه‌ی بالابر (با هدف جلوگیری از شکست آسترها و گلوله‌ها) و تغییر در نسبت فاصله به ارتفاع بالابرها (برای کاهش فشردگی و بهبود بالابری بار و ظرفیت آسیاکنی) است.

استفاده از آسترهایی با زاویه صفحه بالابر و فاصله بیشتر در سال‌های اخیر افزایش یافته است. افزایش زاویه‌ی صفحه‌ی بالابر در آسترهای جداره‌ی آسیا (برای یک سرعت مشخص در آسیا) نقطه‌ی برخورد گلوله‌های پرتاب شده روی دیواره‌ی طرف مقابل را (بر حسب فاصله آن از پاشنه) کاهش می‌دهد و در نتیجه موجب کاهش آسیب به آسترها می‌شود. با افزایش زوایه‌ی صفحه‌ی بالابر میزان برخورد مستقیم گلوله با آسترها کاهش پیدا می‌کند.

حداکثر ابعاد گلوله‌های اضافه شده به آسیا نیز از مقدار معمول ۱۰۴ میلیمتر به ۱۲۵ میلیمتر و در بعضی موارد به ۱۴۰ و ۱۵۲ میلیمتر رسیده است. این مسئله رویکرد جدید در طراحی آسترها را، با در نظر گرفتن حرکت بار و به خصوص مسیر حرکت گلوله‌ها در داخل آسیا، ضروری می‌نمود (McIvor, 1983; Powell et al., 2006; Rajamani, 2006; Royston, 2003). تاثیر زاویه صفحه‌ی بالابر بر مسیر حرکت بار یک مسئله‌ی شناخته شده است. با توسعه‌ی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مسیر حرکت بار، تغییر زاویه صفحه‌ی بالابر و نسبت فاصله به ارتفاع در طراحی آسترها در نظر گرفته شد (Powell et al., 2006; Rajamani, 2006; Yahyaei and Banisi, 2010). با افزایش فاصله بین آسترها، فضای میان آنها بیشتر شده، نرخ بالابری افزایش می‌یابد، میزان ریزش بار در پاشنه و نسبت ضربات شدت بالا، بیشتر می‌شود (Royston, 2007).

۱-۱-۳- عوامل عملیاتی

با افزایش سرعت آسیا تا حد مطلوب، بالاروی بار و فراوانی برخوردهای درون آسیا افزایش می‌یابد که باعث افزایش نرخ خردایش می‌شود، اما با بیشتر شدن سرعت، بر ضربات مستقیم گلوله به آسترها افزوده می‌شود که باعث سایش بیشتر آستر و کاهش نرخ خردایش می‌گردد

(Rezaeizadeh et al., 2010). در سرعت‌های بالا، آسیاهای دارای آسترهای با ارتفاع بالابر کم، توان بیشتری مصرف می‌کنند در حالی که آسترهای با ارتفاع زیاد توان‌کشی را کاهش می‌دهند (Royston, 2007; Djordjevic et al., 2004).

با تغییر زاویه صفحه بالابر، به منظور افزایش ضربات گلوله بر پاشنه، سرعت آسیا افزایش داده می‌شود. این کار باعث بهبود عملکرد آسیاکنی با افزایش مشارکت بار- گلوله می‌شود. هرچند در آسیاهای تر با افزایش سرعت به بیش از ۸۰-۷۸ درصد سرعت بحرانی، کارایی آسیاکنی در نتیجه کاهش بالابری پالپ، تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Royston, 2007; Djordjevic et al., 2004).

افزایش پرشدگی باعث کاهش شعاع داخلی بار، افزایش سهم خردایش درنتیجه سایش و کاهش شکست ذرات درنتیجه انرژی ضربه‌ای می‌شود (Djordjevic et al., 2004). پرشدگی کمتر از ۲۵٪ آسیا باعث افزایش نرخ سایش و شکسته شدن آسترها می‌شود. با افزایش پرشدگی بالاتر از ۲۵٪، خردایش در نتیجه ضربه افزایش نمی‌یابد ولی توان آسیا بیشتر می‌شود. این افزایش توان، برای افزایش شکست در اثر سایش مصرف می‌شود، در نتیجه محصول آسیا نرم‌تر می‌شود (Rezaeizadeh et al., 2010).

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، آسیاکنی بیشترین سهم مصرف کل انرژی را دارد. مسیر حرکت بار یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کارایی خردایش و توان‌کشی است. تغییر در نقطه برخورد گلوله درنتیجه تغییر طرح آستر، منجر به برخورد مستقیم گلوله به آستر، شکسته شدن آستر و توقفات بسیار هزینه بر آسیا می‌شود (Banisi and Hadizadeh, 2007).

فهم بهتر سازوکار انرژی مصرفی و دینامیک بار آسیا می‌تواند منجر به صرفه جویی چشمگیر انرژی مصرفی شود و با تغییر عواملی مانند سرعت و طرح آستر، باعث افزایش ظرفیت و کارایی انرژی مصرفی و آسان تر شدن کنترل آن شود. از آنجا که مشاهده مستقیم شکل بار و مسیر حرکت آن در آسیاهای صنعتی امکان‌پذیر نیست ترکیبی از روش‌های فیزیکی و تحلیلی برای تعیین شکل بار استفاده شد.

به منظور تعیین مسیر حرکت بار در داخل آسیا به صورت تحلیلی و با توجه به مشخصات آستر و شرایط عملیاتی آسیا، یحیایی و بنیسی (۲۰۱۰) برنامه‌ی کامپیوتری را با عنوان GMT[1] بر پایه نرم‌افزار صفحه گسترده Microsoft Excel© توسعه دادند. در این نرم‌افزار از روابط ارائه شده توسط Powell (1991)، برای مدل‌سازی مسیر حرکت تک گلوله و از روابط Morrell (1993) برای تعیین شکل بار داخل آسیا استفاده شده است.

در نرم‌افزار GMT، شکل بار بر اساس دو عامل سرعت آسیا و پرشدگی تعیین می‌شود و خصوصیات آستر مانند زاویه صفحه بالابر، تعداد و ارتفاع بالابرها در این محاسبات درنظر گرفته نمی‌شوند. همچنین مسیر حرکت بار در این نرم‌افزار که توسط روابط Powell (1991) بدست می‌آید، تنها بیرونی‌ترین مسیر بار (تک گلوله) را در نظر می‌گیرد و از تأثیر بار و برهم‌کنش میان ذرات چشم پوشی می‌کند. تأثیر شکل آستر در این نرم‌افزار و نرم‌افزارهای مشابه در نظر گرفته شده است ولی این تأثیر تنها مربوط به حرکت تک گلوله است که با واقعیت فاصله زیادی دارد. همین عوامل مهم‌ترین دلایل محدود کننده استفاده از این چنین نرم‌افزارهایی است که می‌تواند منجر به خطاهای چشمگیری شود.

در این تحقیق، مسیر اندازه‌گیری شده حرکت بار در آسیای مدل با نتایج حاصل از نرم‌افزار GMT مقایسه گردید. مسیر گلوله‌های در حال چرخش با استفاده از دوربین سرعت بالا عکس‌برداری شد و موقعیت زاویه‌ای پاشنه، شانه و نقطه برخورد بار اندازه‌گیری گردید. هدف این پروژه ارائه روابط تجربی برای تصحیح شکل بار و مسیر حرکت تک گلوله بود. همچنین، تأثیر پرشدگی، سرعت و نوع آستر بر نقطه برخورد بار به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. این کار با هدف تصحیح مسیر حرکت بار و سازگار کردن آن با واقعیت و شرایط عملیاتی بود.

۱-۲-۱- آسیاهای شرکت معدنی و صنعتی گل گهر

شرکت معدنی و صنعتی گل گهر سیرجان با تولید سالانه ۶ میلیون تن کنسانتره، یکی از قطب‌های مهم تولید کننده سنگ آهن در کشور می‌باشد. مواد استخراج شده پس از حمل توسط کامیون و خردایش در سنگ شکن ژیراتوری، از ابعاد حدود ۲ متر، به ابعاد زیر ۲۰ سانتی‌متر رسانده

[1] Grinding Media Trajectory