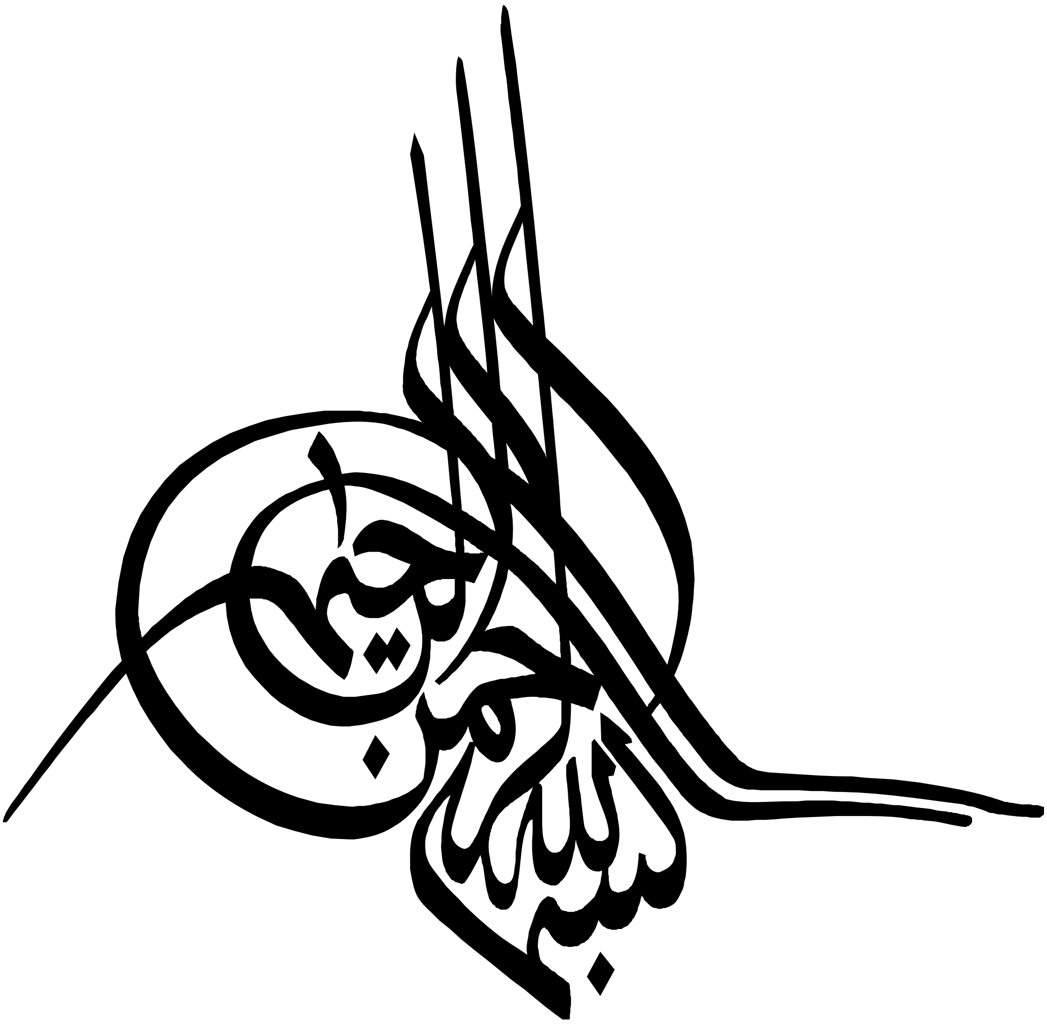

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

رساله تحصیلی برای دریافت درجه دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

بررسی سینماتیکی و سینتیکی محتویات داخل آسیا وعوامل مؤثر برعملکردآن بکمک مدل آزمایشگاهی و حل عددی المان گسسته

استاد راهنما :

دکترمجید فولادی

استاد مشاور :

دکتر سید حسین منصوری

مؤلف :

مسعود رضائی زاده

تیرماه ۱۳۸۹

این رساله به عنوان یکی ازشرایط احراز درجه دکتری تخصصی به

گروه مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: آقای مسعود رضایی زاده

استاد راهنما: آقای دکتر مجید فولادی

داور۱: آقای دکتر علیرضا سعیدی

داور۲: آقای دکتر غلامحسین برادران

داور۳: آقای دکتر منصور نیکخواه بهرامی (استاد دانشگاه تهران)

استاد مشاور پروژه: آقای دکتر سید حسین منصوری

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی: آقای دکتر پور ابراهیم

نماینده تحصیلات تکمیلی دکتر علی رشتی

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش پروردگار حکیم و مهربان که ره توشهٔ دانش در کوله بار اشرف آفریدگان خویش نهاد و با کرامت علم الاسماء به بنده خود شایستگی مقام خلیفه اللهی را ارزانی او داشت. سپاس همه معلمان پاک سرشت که ظلمت جهل و نادانی را به شاهراه علم و حقیقت رهنمون گشتند.

تشکر و قدردانی فراوان از **پدر و مادر** عزیزم به خاطر تمامی زحماتی که در دوران پر فراز و نشیب تحصیل و زندگی ام متحمل شدند.

سپاس ویژه از **همسر مهربانم** که الگوی فداکاری و مهربانی است و در طول دوران تحصیل همواره یار وهمراه من بود.

سپاس ویژه ازاستاد راهنمای محترم جناب آقای **دکتر مجید فولادی** که الگوی تواضع توأم با دانش و آگاهی بوده و با صبر و حوصله اینجانب را در انجام این رساله هدایت فرمودند.

سپاس فراوان از استاد مشاور بزرگوار جناب آقای **دکتر سید حسین منصوری** که با راهنمایی های بی دریغشان سختی های این رساله را بر اینجانب آسان نمودند.

سپاس بی دریغ از استاد عزیز جناب آقای **دکتر ما لکوم پاول**[1] که از راهنمایی های مؤثر ایشان در طول فرصت مطالعاتی استفاده نموده ام.

سپاس فراوان از استاد فرهیخته و چهره ماندگار ایران واستاد دانشکده فنی مهندسی مکانیک دانشگاه تهران جناب آقای **دکتر منصور نیکخواه بهرامی** که داوری این رساله را بر عهده داشتند.

سپاس ویژه از داوران محترم بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شهید باهنر کرمان **جناب آقای دکتر علیرضا سعیدی** و **جناب آقای دکترغلامحسین برادران** که مرا در تصحیح این رساله یاری کردند.

تشکر و قدردانی صمیمانه از همکاری **مجتمع مس سرچشمه** در خصوص ساخت آسیای آزمایشگاهی، بخصوص از **واحد تحقیقات** و **سرکار خانم مهندس زید آبادی** و **مهندس محمودآبادی** و **مهندس یاراحمدی** که در انجام این تحقیق ما را یاری نمودند.

تشکر ویژه از **آقای مهندس آخوندی زاده** که در انجام آزمایشها همکاری فراوان نموده اند.

---

[1] Malcolm Powell

تقدیم به اسوه صبر و محبت

مادر

تقدیم به اسوه بزرگی و تلاش

پدر

تقدیم به اسوه مهر و ایثار

همسر

تقدیم به فرزندان دلبندم

محمد حسین و زهرا

چکیده :

خردایش یکی از مراحل مهم فرایند فراوری مواد معدنی می باشد و آسیاهای خودشکن(Autogenous Mills) ونیمه خود شکن(Semi-Autogenous Mills) از متداولترین آسیا هایی هستند که جهت خردایش مواد معدنی استفاده می شوند. بنابراین شناخت سینماتیک محتویات داخل آسیا وعوامل موثر در عملکرد آسیاها جهت افزایش بازدهی وعملکرد آسیا ضروری به نظر می رسد . هدف اصلی از این تحقیق بهینه سازی عملکرد آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه و جلوگیری از شکست زود هنگام لاینرها میباشد.

در این تحقیق ابتدا جهت ساخت یک مدل آزمایشگاهی، معادلات سینماتیکی و سینتیکی حاکم بر محتویات داخل آسیا بررسی شده وسپس پارامترهای بدون بعد بر اساس معادلات حاکم استخراج شده است .دراین کار همچنین براساس نتایج آزمایشگاهی یک مدل تحلیلی جهت محاسبه توان آسیا و سایش لاینرها ارائه گردیده است. درضمن از حل عددی با روش المان گسسته (DEM) جهت محاسبه بعضی از متغیرها استفاده شده و در پایان بر اساس نتایج آزمایشگاهی وحل عددی یک مدل کاربردی جهت بهینه سازی عملکرد آسیای واقعی ارائه گردیده است. نتایج کار حاضر با کارهای قبلی انجام شده در این زمینه مقایسه شده و نتایج حاصل از این تحقیق انطباق خوبی را با سایر نتایج نشان می دهد. لازم به ذکر است در راستای انجام این تحقیق دو دستگاه آزمایشگاهی درمجتمع مس سرچشمه و مرکز تحقیقات JKMRC استرالیا طراحی و ساخته شده است. دستگاه نیمه خودشکن آزمایشگاهی ساخته شده در مجتمع مس سرچشمه به عنوان یک اختراع به ثبت رسیده است.

فهرست مطالب **صفحه**

فصل اول: مقدمه

مقدمه ۲

۱- ۱ تاریخچه خردایش و پیدایش آسیا ۲

۱- ۲ انواع آسیا ۸

۱- ۳ مکانیزم عملکرد آسیای گردان ۱۸

۱- ۴ مشخصه های عملکرد آسیا ۲۴

۱- ۴ – ۱ توان مصرفی آسیا ۲۴

۱ – ۴ - ۲ خردایش ۲۵

۱ – ۴ – ۳ واسطه های خردایش ۲۸

فصل دوم: سینماتیک و سینتیک ذرات داخل آسیا

۲-۱ بررسی سینماتیک و سینتیک ذرات داخل آسیا ۳۱

۲- ۲ بررسی حرکت با شرایط غلتش خالص ۳۳

۲- ۳ بررسی حرکت با وجود لغزش ۳۵

فصل سوم: شبیه سازی آسیا

۳- ۱ شبیه سازی آسیای واقعی به کمک آسیای آزمایشگاهی ۴۰

۳- ۲ مشخصات آسیای آزمایشگاهی ۴۳

۳ – ۳ بررسی اثر پارامترهای مؤثر در عملکرد آسیا بروش آزمایشگاهی ۴۵

۳ – ۴ مشخصات مدل آزمایشگاهی ۴۷

۳ – ۵ بررسی تاثر لاینرها و سرعت بر روی توان آسیا ۵۰

۳-۶ اثر پارامتر S/H بر عملکرد آسیا ۵۳

۳ – ۷ اثر ارتفاع لاینرها بر روی بارهای ضربه ای ۵۵

۳ – ۸ اثر تعداد لاینر ها بر روی بارهای ضربه ای ۵۷

۳ – ۹ اثر میزان شارژ آسیا بر روی بارهای ضربه ای ۵۹

۳ – ۱۰ اثر سرعت آسیا بر روی بارهای ضربه ای و مسیر حرکت محتویات آسیا ۶۱

۳ – ۱۱ نتایج ۶۴

۳ – ۱۲منابع و مآخذ ۶۵

فصل چهارم: شبیه سازی عملکرد آسیا با روش المان گسسته

۴ – ۱ روش المان گسسته (DEM) ۶۹

۴ – ۲ معادلات ساختاری روش المان گسسته ۷۰

۴ – ۲ – ۱ قانون نیرو – جابجایی ۷۲

۴ - ۲ - ۲ قوانین مربوط به حرکت ذرات ۷۹

۴ – ۳ مدلسازی آسیای آزمایشگاهی با روش المان گسسته ۸۱

۴ – ۴ بررسی اثر تعداد و ارتفاع لاینر ها بر توان آسیا ۸۲

۴ – ۵ بررسی اثر تعداد و ارتفاع لاینرها بر انرژی مصرفی و ضربه ۸۵

۴- ۶ تاثیر تعداد لاینرها بر میدان سرعت محتویات آسیا ۸۶

۴ – ۷ اثر سرعت بر توزیع ذرات داخل آسیا ۸۸

۴ – ۸ نتایج ۹۰

۴ – ۹ منابع و مآخذ ۹۰

فصل پنجم: بررسی عوامل موثر بر سایش لاینرها بروش آزمایشگاهی

۵ – ۱ بررسی سایش لاینرها بروش آزمایشگاهی ۹۵

۵ – ۲ روش انجام آزمایش و معرفی تجهیزات ۹۶

۵ – ۳ اثر میزان شارژ آسیا بر روی نرخ سایش ۹۷

۵ – ۴ تاثیر سرعت آسیا بر روی نرخ سایش ۹۹

۵ – ۵ تاثیر اندازه ذرات بر روی نرخ سایش ۱۰۱

۵ – ۶ اثر جنس مواد بر روی نرخ سایش ۱۰۳

۵ – ۷ نتایج ۱۰۵

۵ – ۸ منابع و مآخذ ۱۰۵

فصل ششم: مدلسازی سایش لاینر ها

۶ – ۱ مدلسازی سایش لاینر ها ۱۰۸

۶ – ۲ مدل کردن سایش ۱۰۹

۶ – ۳ اعتبار سنجی مدل ۱۱۷

۶ – ۴ بررسی تاثیر پارامتر های مختلف بر روی سایش به کمک مدل جدید ۱۱۹

۶ – ۵ نتایج ۱۲۲

۶-۶ منابع و مآخذ ۱۲۳

فصل هفتم: ارائه مدل تحلیلی جهت محاسبه توان آسیا

۷ – ۱ارائه یک مدل تحلیلی جدید جهت محاسبه توان آسیا براساس نیروی ثقل واصطکاک ۱۲۸

۷ – ۲ معادلات ساختاری ۱۲۹

۷ – ۳ اعتبار سنجی مدل ۱۳۶

۷ – ۴ بررسی اثر پارامترهای موثر در توان آسیا به کمک مدل جدید ۱۳۸

۷ – ۵ نتایج ۱۴۱

۷ – ۶ منابع و مآخذ ۱۴۲

نتایج ۱۴۴

پیشنهادات ۱۴۵

فهرست علائم لاتین

B	Liner base width, m	پهنای لاینر
D	Mill diameter, m	قطر آسیا
E	Fractional porosity of charge	میزان تخلخل در شارژ
f	Friction force, N	نیروی اصطکاک
F	Tangential force, N	نیروی مماسی
g	Acceleration due to gravity, ms^{-2}	شتاب جاذبه
H	Height of lifters, m	ارتفاع لاینر
J_B	Fraction of mill volume occupied by ball	حجم گلوله داخل آسیا
J_t	Fraction of mill volume occupied by ore and ball	حجم سنگ و گلوله داخل آسیا
l	Effective length of mill, m	طول مؤثر آسیا
N	Number of rows of liners	تعداد لاینرها
N_c	Critical mill rotation, $revs^{-1}$	سرعت بحرانی آسیا
N_m	Mill rotation rate, $revs^{-1}$	سرعت آسیا
N_r	Rotation rate of particle at radial distance, r, from centre of mill, $revs^{-1}$	سرعت ذرات در شعاع دلخواه
P_{net}	Power delivered to charge, kw	توان خالص آسیا
r	Radial position, m	موقعیت شعاعی ذرات

r_b	Radius of balls	شعاع گلوله
r_{eq}	Equivalent radius of the mill, m	شعاع مؤثر آسیا
r_i	Radial position of charge surface, m	موقعیت شعاعی سطوح اصطکاکی
r_m	Effective radius of mill inside liners, m	شعاع مؤثر آسیا
T	Torque, N.m	گشتاور
s	space between lifters	فضای بین لاینرها
S	Fractional solids content of discharge slurry	میزان جامد تخلیه شده از آسیا
U	Fraction of charge voids occupied by slurry	فضای خالی پر شده توسط دوغاب

فهرست علائم یونانی

α	Angular position at which the ball leaves the mill wall, degree	موقعیت جدایش گلوله از بدنه آسیا
ζ	percentage of total mill charge	درصد شارژ آسیا
η	Fraction of critical speed	درصد سرعت بحرانی
Θ_s	Angular displacement departure shoulder position, radians	موقعیت شانه بار
Θ_t	Angular displacement toe position, radians	موقعیت پاشنه بار
μ_k	Dynamic coefficient of friction	ضریب اصطکاک دینامیکی
μ_s	Static coefficient of friction	ضریب اصطکاک استاتیکی
ρ	Density of total charge,tm^{-3}	دانسیته کلی محتویات داخل آسیا
ρ_B	Density of balls, tm^{-3}	دانسیته گلوله
ρ_s	Density of ore, tm^{-3}	دانسیته سنگ معدن
φ	Liners inclination angle, degree (from the redial line)	زاویه پیشانی لاینر
ψ	Mill rotation while the ball traverse the lifter height, degree	زاویه پیشانی لاینر
ω	Angular velocity	سرعت زاویه ای
ω_r	Angular velocity of particle at radial distance, r, from centre of mill, rads^{-1}	سرعت زاویه ای در شعاع دلخواه
ω_c	Critical angular velocity	سرعت زاویه ای بحرانی

فصل اول:

مقدمه

مقدمه

با توجه به وجود نقش برجسته آسیاهای نیمه خودشکن در فرآیند استخراج فلزات از سنگ معدن، بررسی عملکرد چنین آسیاهائی جهت افزایش بازدهی آنها از اهمیت بالائی برخوردار است. پژوهشگرهای زیادی در این زمینه تحقیق نموده اند اما بدلیل پیچیدگی عملکرد آسیا و وجود پارامترهای زیاد تأثیر گذار، دستیابی به وضعیت کاملاً مطلوب نیازمند تحقیقات وسیعی است. در کار حاضر با توجه به وجود نرم افزار و سخت افزارهای جدید عملکرد چنین آسیاهائی در جهت بهینه سازی مورد توجه قرار گرفته است. تحقیق حاضر مشتمل بر هفت فصل است، در فصل اول هدف، آشنائی با انواع آسیاها، کاربرد آنها و عوامل مؤثر بر عملکرد آنها میباشد. در فصل دوم معادلات اساسی حاکم بر سینماتیک و سینتیک ذرات داخل آسیا مورد بررسی قرار گرفته است. فصل سوم شامل استخراج و بی بعد سازی پارامترهای مؤثر در شبیه سازی آسیا جهت ساخت مدل آزمایشگاهی بر اساس ابعاد آسیای واقعی میباشد. همچنین در این فصل بکمک آسیای آزمایشگاهی که بر اساس پارامترهای بی بعد ساخته شده، تأثیر پارامترهای مؤثر در عملکرد آسیا بررسی شده است. در فصل چهارم از روش المان گسسته(DEM) جهت بررسی اثر بعضی از پارامترها در عملکرد آسیا که بررسی آنها بروش آزمایشگاهی و تحلیلی امکان نداشته استفاده شده است. فصل پنجم شامل روش آزمایشگاهی جهت بررسی عوامل فرآیندی در سایش لاینرها می باشد و از آنالیز نتایج جهت مدلسازی سایش استفاده شده است. در فصل ششم مدل جدیدی جهت پیش بینی سایش و بررسی عوامل مؤثر پیشنهاد شده است. در فصل هفتم بر اساس نتایج حاصل از فصلهای قبل، مدلی جدید جهت محاسبه توان آسیا بر اساس پارامترهای مؤثر بر آن ارائه شده است. لازم به ذکر است پیشینه پژوهش در هر قسمت بطور جداگانه ذکر گردیده است.

۱-۱تاریخچه خردایش و پیدایش آسیا

بشر در دوره های مختلف تاریخ همواره به فلزات و استفاده از آنها برای انجام امور روزمره وابسته بوده و به روش های مختلف سنگ های معدنی را ذوب کرده و از آنها فلزات مورد نیاز خود را تامین می کرده است. شکستن سنگ معدن و خالص سازی مواد معدنی از آن، با توجه به نبود تکنولوژی های پیشرفته در ابتدا بصورت کاملا ابتدایی انجام می شده است. این کار اوایل با نیروی دست و ذوب توسط آتش های کوچک و تغییر شکل با روش های ساده و دشوار آهنگری انجام می شده است. خالص سازی فولاد برای ساخت ابزارآلات جنگی در همه تمدن ها و تهیه فلزات گرانبها مثل طلا که از دیرباز مورد توجه بوده اند نشان از سابقه بسیار طولانی فرآوری و خردایش مواد معدنی دارد.

امروزه خردایش سنگ معدن در معادن شکل دیگری به خود گرفته است. تجهیزات غول پیکر و پیشرفته روز به روز جایگزین تجهیزات قبل از خود شده و صنعت خردایش را بهبود می بخشند. شکل های مختلف انفجار در معدن، انواع مختلف سنگ شکن و آسیاهای بسیار متنوع در ابعاد گوناگون نشان از تغییرات و بهینه سازی تجهیزات خردایش در طول زمان دارد. وابستگی اجتناب ناپذیر تمامی صنایع به تولیدات فلزی حاصل از معادن و هزینه های خردایش که عمده ترین بخش هزینه را در معادن شامل می شود عواملی هستند که مطالعه مستمر و تغییرات بهینه در تجهیزات خردایش را کاملا توجیه می نماید. در ادامه ابتدا شرح مختصری از مسیر کلی خردایش و تجهیزات مورد نیاز آن ارائه می گردد و در ادامه انواع آسیاها معرفی شده و نحوه کارکرد آسیاهای دوار ارائه شده است.

استخراج سنگ ها از دل زمین در ابتدا بسیار دشوار و با سرعت خیلی پایین انجام می گرفته است. بعلت نبود تجهیزات صنعتی و نیروی برق، بیشتر کارهای معدنی توسط تعداد بسیار زیاد نیروی انسانی انجام می شده است. امروزه به علت پیشرفت علم و صنعت، این فعالیت ها نسبت به گذشته با سرعت، دقت و حجم بسیار گسترده تری صورت می گیرد.

اولین مرحله خردایش، استخراج سنگ از معدن است که توسط انفجارهای کنترل شده و همراه با کار کارشناسی دقیق در معدن انجام شده و قطعات بزرگ سنگ معدن را از دل زمین یا کوه جدا می‌کند. ابعاد این سنگ ها معمولاً بسیار بزرگ می باشند و توسط ماشین آلات بارگیری عظیم بنام شاول[1] درون کامیونهای بزرگ که ظرفیت حمل بار بالای ۱۲۰تن دارند ریخته شده و به سمت سنگ شکن اولیه منتقل می شوند.

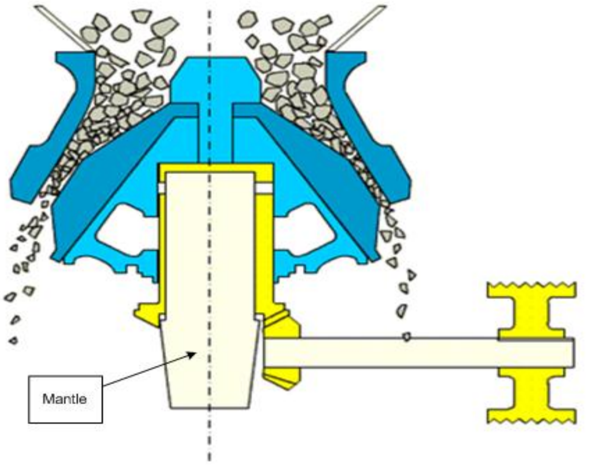
بدین ترتیب سنگ وارد مدار اصلی خردایش می شود. اولین عضو این مسیر سنگ شکن اولیه است که معمولا حفره ای قطور با جداره فلزی است که دسته‌ای فلزی بنام منتل[2] درون آن دائما در حال حرکت است و در حین حرکت متناوباً فاصله آن با جداره کم و زیاد می‌شود. هنگامی که این فاصله زیاد باشد سنگ را به فضای بین دسته و دیواره کشانده و با کم کردن این فاصله، شکست سنگ و کاهش ابعاد آن را موجب می‌شود. با کنترل فاصله های بین دسته و دیواره، امکان تنظیم ابعاد سنگ معدن خروجی از سنگ شکن وجود دارد. این کار امکان تغییر ابعاد خوراک ورودی به آسیای اولیه را فراهم می‌کند. اما برای ابعاد ورودی به سنگ شکن باید محدودیتی تعیین شود زیرا سنگ با ابعاد بزرگ تر از مقدار مجاز در دهانه آن گرفتار شده، دهانه را بسته و کارکرد آن را دچار مشکل می کند. شکل (۱-۱) نشان دهنده یک نمونه سنگ شکن معروف به ژیراتوری است. دسته منتل در این سنگ شکن به یک چرخدنده خارج از مرکز متصل بوده که توسط یک پینیون مخروطی دوران می‌کند.

پس از سنگ شکن، سنگ معدن وارد فرآیند بعدی کاهش اندازه یعنی خردایش در آسیا می‌شود. این انتقال توسط نوار نقاله ها انجام می پذیرد. آسیاها درواقع مهمترین تجهیزات معادن بوده و تمام مراحل جدا سازی فلزات از سنگ معدن اولیه، بعد از آسیا انجام می‌شوند و در صورت بروز مشکل در فعالیت آسیا و یا بهینه نبودن عملکرد آن مراحل بعدی تولید نیز به ناچار تحت تاثیر قرار می گیرند.

---

[1] Shavel

[2] Mantle



شکل۱- ۱ نمونه ای سنگ شکن معروف به ژیراتور

بنابراین سلامت این تجهیزات برای تداوم تولید در کارخانجات معدنی بسیار ضروری است. آسیاها تجهیزات بسیار عظیمی بوده و توان بسیار زیادی نیز نیاز دارند. توان مصرفی آنها عمدتا بیش از ۸ مگاوات می‌باشد. درواقع آنها بیشترین مصرف انرژی را در یک مجموعه معدنی داشته و البته بخش عمده‌ای از این انرژی به شکل‌های مختلف هدر می‌رود. از آن جمله می‌توان به اتلاف انرژی در محل تماس دندانه‌های پینیون و چرخدنده محیطی، تلفات ناشی از گردش استوانه در بیرینگ های حامل، گرمای جذب شده توسط چرخه هوا، گرمای جذب شده توسط محصول تولید شده و شکل های مختلف اصطکاک را نام برد. این اتلافات باعث می شود که بازده این تجهیزات صنعتی پایین باشد.

در این مرحله بسته به نوع تخلیه ای که برای آسیا در نظر گرفته شده است موادی که به ابعاد قابل خروج رسیده اند، از آسیا خارج شده و بر روی سرندهای در نظر گرفته شده می ریزند تا طبقه بندی شوند. موادی که به ابعاد مورد نیاز مراحل بعدی رسیده اند جدا شده به مرحله بعد که آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن قرار دارند فرستاده می شوند و آن دسته که قابل خردایش بیشتر نبوده و خردایش بیشتر آنها توسط آسیا های خودشکن و نیمه خودشکن بازدهی لازم را نداشته باشد برای خردایش بیشتر به آسیاهای گلوله ای فرستاده می شوند. بخشی از مواد هم که قابلیت خردایش مجدد