

آسیاهای نرم کننده (Grinding Mills)

۹-۱- مقدمه

- نرم کردن آخرین فرآیند خردایش است.
- در عملیات نرم‌کنی مکانیزم‌های کاهش ابعاد ذرات، ضربه و ساییش (Impact & Abrasion) می‌باشند.
- آسیاها اغلب بصورت محفظه‌های فولادی استوانه‌ای گردان (Tumbling Mills) ساخته می‌شوند.
- بار خرد کننده که ممکن است شامل میله‌های فولادی، گلوله‌ها، سنگ‌های سخت و یا خود کانه باشد، در داخل آسیا بطور آزادانه حرکت می‌کنند.
- در عملیات آسیا کنی، ذرات از ابعاد $5mm-250$ به $10\mu m-300$ رسانده می‌شوند.
- بالاترین انرژی مصرفی در کارخانه کانه‌آرایی، به خردایش نسبت داده می‌شود. (۵۰٪ کل انرژی مصرفی)
- عمل نرم کردن در اثر ضربات اتفاقی صورت می‌گیرد که در آن هر دوی ذرات آزاد و قفل شده وجود دارند.



با ارزش آزاد



گانگ آزاد



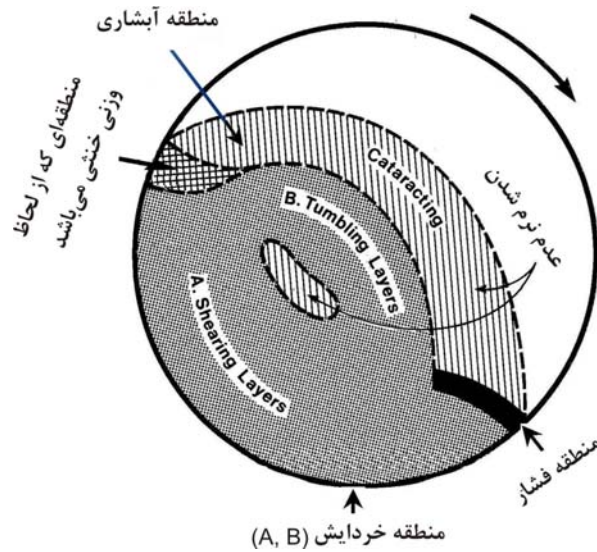
قفل شده

شکل ۹-۱- انواع ذرات از نظر میزان آزاد شدگی

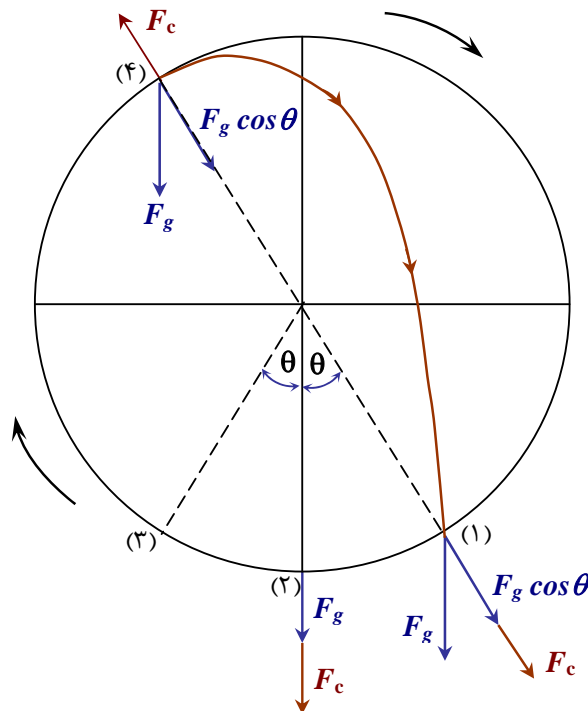
- فقط ذرات قفل شده برای نرم کردن مناسب می‌باشند.
- حالت ایده‌آل، وارد کردن ضربه در مرز بین دانه‌های کانیها است.
- اندازه محصول نهایی توسط بار خرد کننده، سرعت چرخش آسیا، نوع کانه تغذیه شده، نوع مواد مورد استفاده و زمان توقف ذرات در آسیا تعیین می‌شود.

۹-۲- حرکت بار (Charge) در آسیای گردان

- مقدار بار خرد کننده معمولاً از نصف حجم آسیا کمتر است. (۴۰٪ حجم آسیا با گلوله پر می‌شود)
- به دلیل چرخش و اصطکاک آستر آسیا، مواد خرد کننده تا یک نقطه‌ای که تعادل دینامیکی حاصل شود به بالا حمل می‌شوند (برابری نیروی گریز از مرکز و مؤلفه شعاعی وزن گلوله).



شکل ۹-۲- نواحی مختلف در آسیای گردان



N : سرعت آسیا (RPM)

D : قطر آسیا (m)

d : قطر گلوله (m)

g : شتاب جاذبه (m/s^2)

m : جرم گلوله (kg)

V : سرعت خطی گلوله (m/s)

شکل ۹-۳- نیروهای وارده بر واسطه خردایش (گلوله)



- در نقطه (۱) نیروی نگهدارنده گلوله، مجموع مؤلفه عمودی وزن ($F_g \cos\theta$) و نیروی گریز از مرکز (F_c) می‌باشد.
- در نقطه (۲) نیروی نگهدارنده به حداکثر خود می‌رسد.
- در نقطه (۳) نیروی نگهدارنده مانند نقطه (۱) است.
- در نقطه (۴) نیروی نگهدارنده کاهش می‌یابد و در این نقطه مؤلفه عمودی وزن با نیروهای گریز از مرکز برابری می‌کند.

$$F_g \cos(\theta) = F_c$$

$$mg \cos(\theta) = \frac{mV^2}{R} \quad V = \frac{2\pi RN}{60} \quad R = \frac{D-d}{2}$$

$$\cos(\theta) = 0.0011N^2R$$

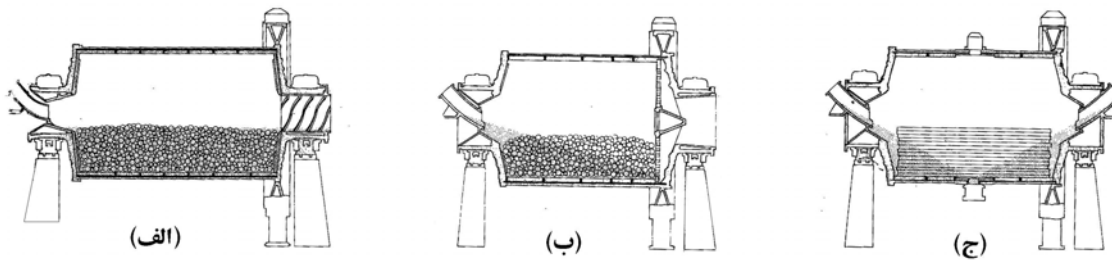
در سرعتهای بحرانی $\cos(\theta) = 1 \Leftarrow \theta = 0$

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D-d}}$$

N_c : سرعت بحرانی (RPM)

- سرعت آسیا باید طوری باشد که گلوله‌های در حال سقوط به پاشنه بار برخورد کنند نه روی آستر، زیرا در غیر اینصورت آستر سریع ساییده می‌شود.
- در سرعت آسیای یکسان، هر چه بار به ارتفاع بیشتری برده شود، عمل خرد کردن بهتر انجام می‌شود.
- سرعت کم و یا آستر صاف باعث لغزش گلوله‌ها روی هم می‌شود و خردایش اساساً سایشی می‌شود.
- در سرعتهای زیاد، حرکت آبشاری (Catacting) مواد خرد کننده به خردایش توسط ضربه و محصول نهایی درشت‌تر و سایش کمتر منجر می‌شود.
- سرعت بحرانی (Critical Speed) سرعتی است که بار دور پوسته بدون جدا شدن از آن به همراه آسیا بچرخد. در این حالت عمل خردایش صورت نمی‌گیرد.
- در عمل، لغزش بین بار خرد کننده و آستر آسیا وجود دارد و در نتیجه سرعت بحرانی بیش از مقدار محاسباتی در نظر گرفته می‌شود.
- آسیاها معمولاً با سرعتهایی معادل ۵۰٪-۹۰٪ سرعت بحرانی کار می‌کنند.
- افزایش سرعت آسیا، ظرفیت آن را افزایش می‌دهد.
- سرعت کم وقتی استفاده می‌شود که ظرفیت کامل قابل دسترسی نیست و سرعت زیاد برای ظرفیت بالا و نرم کردن ذرات درشت به کار می‌رود.

○ آسیاها بر حسب نوع ورود و خروج مواد به سه دسته تقسیم می‌شوند:



شکل ۹-۴- انواع آسیاها بر حسب ورود و خروج مواد

(الف) خروجی به صورت سرریز، (ب) خروجی توسط شبکه و (ج) خروجی از محفظه‌های اطراف پوسته

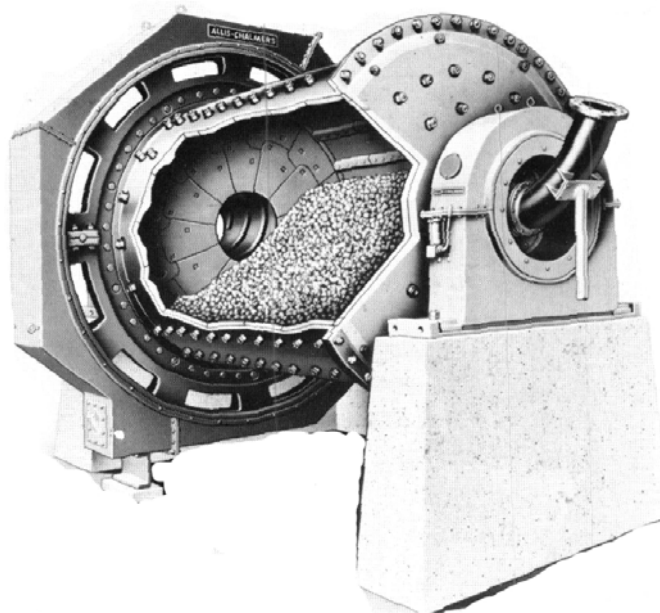
○ معمولاً خوراک بطور پیوسته از یک طرف آسیا وارد می‌شود و از طرف دیگر خارج می‌شود. در بعضی از کاربردها، محصول ممکن است از طریق محفظه‌ای که در اطراف پوسته تعبیه شده خارج شود.

۹-۳- آسیاهای گردان (Tumbling Mills)

- آسیاهای گردان به سه نوع اصلی تقسیم می‌شوند: گلوله‌ای، میله‌ای و خود شکن.
- هر چه ابعاد ذرات خوراک بزرگتر باشد، قطر آسیا نیز برای خرد کردن مناسب بایستی بزرگتر شود.
- طول آسیا با توجه به حجم مورد نیاز (ظرفیت) تعیین می‌شود.

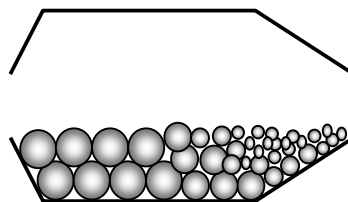
۹-۳-۱- آسیاهای گلوله‌ای (Ball Mills)

○ در آسیاهای گلوله‌ای نسبت طول به قطر کمتر از $2/5$ می‌باشد.



شکل ۹-۵- آسیای گلوله‌ای

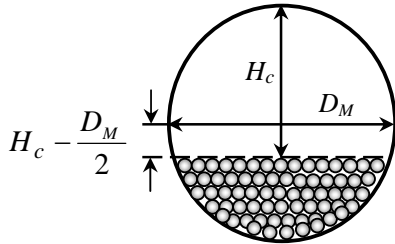
- چون گلوله‌ها دارای سطح جانبی بر واحد وزن بیشتری نسبت به میله‌ها می‌باشند در نتیجه برای نرم کردن ریزتر مناسب می‌باشند.
- در نرم کردن اولیه، معمولاً قطر گلوله‌ها بین $10-5\text{ cm}$ بوده و در نرم کردن مجدد قطر گلوله‌ها $5-2\text{ cm}$ می‌باشند.
- آسیاهای گلوله‌ای که نسبت طول به قطر آنها بیش از ۳ باشد به آسیاهای لوله‌ای (Tube Mills) معروف می‌باشند.
- آسیاهای لوله‌ای که بار خرد کننده آنها ذرات سخت سرند شده می‌باشد به آسیاهای قلوه سنگی (Pebble Mills) معروف هستند.
- دانسیته پالپ نبایستی خیلی زیاد باشد چون جریان مواد در طول آسیا مشکل می‌شود و از طرف دیگر نبایستی خیلی رقیق باشد چون باعث تماس فلز و در نتیجه افزایش مصرف فولاد می‌شود.
- برای بالا بردن کارایی نرم کردن، گلوله‌ها بایستی تا حد امکان کوچک باشند و باید طوری طراحی شوند که بزرگترین گلوله توانایی خرد کردن بزرگترین و سخت‌ترین ذرات خوراک را داشته باشد.
- گلوله‌ها از فولاد آلیاژی با کربن بالا ساخته می‌شوند و مصرف آنها بین $0/1$ تا 1 کیلوگرم بر هر تن است که بسته به سختی کانه، ریزی نرم کردن و کیفیت بار خرد کننده، تغییر می‌کند.
- مصرف گلوله در اثر سه عامل زیر به وجود می‌آید:
 - ۱) سایش
 - ۲) ضربه
 - ۳) خوردگی شیمیایی
- در مصرف گلوله‌ها، عامل عمده سایش است و خوردگی شیمیایی بخش کوچکی از آن را تشکیل می‌دهد (کمتر از 10%).
- جدایش گلوله‌ها در داخل آسیا به دلیل شکل خاص آن صورت می‌گیرد.



شکل ۹-۶- جدایش گلوله‌ها در آسیای با انتهای مخروطی

۹-۳-۱-۱- حجم بار (Charge Volume)

○ به درصد حجم اشغال شده فضای داخل آسیا توسط گلوله‌ها که شامل فضای خالی بین گلوله‌ها نیز می‌شود، حجم بار گفته می‌شود.



H_C : فاصله بین سطح گلوله‌های ساکن و بالای آسیا
 D_M : قطر داخلی آسیا

اگر L معرف طول آسیا باشد:

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

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

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

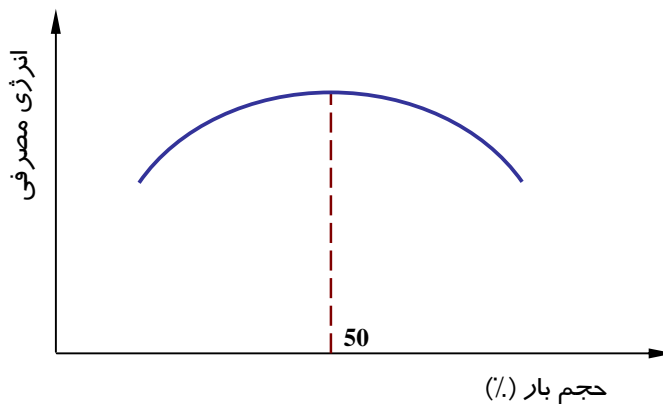
$$113.7 D_M - 127.3 H_C > 0$$

بنابراین، رابطه محاسبه حجم بار در محدوده $H_C > 0$ و $\frac{H_C}{D_M} < 0.893$ معتبر می‌باشد.

○ برای آسیاهای سرریز شونده (Overflow Mills) حداکثر حجم گلوله‌ها، ۴۴٪-۴۰٪ حجم آسیا است.

○ شکل زیر رابطه انرژی مصرفی و حجم اشغال شده توسط بار خرد کننده را نشان می‌دهد.

فاصله مرکز ثقل بار از محور آسیا \times وزن بار \propto انرژی مصرفی



شکل ۹-۷- رابطه انرژی مصرفی با حجم اشغال شده آسیا



۹-۳-۱-۲- اندازه بار خرد کننده

○ گلوله‌های ریز به دلیل سطح زیاد، ظرفیت آسیا کردن را افزایش می‌دهند. ولی از طرف دیگر ممکن است انرژی لازم برای خرد کردن ذرات درشت را نداشته باشند. افزایش سرعت و قطر آسیا می‌تواند تا حدی این مشکل را کاهش دهد.

○ رابطه تجربی برای تعیین اندازه گلوله‌هایی که بایستی به آسیا اضافه کرد:

$$D_m = \left[\frac{d_{80,I} W_i}{K D_M^{0.25}} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)^{0.5} \left(\frac{N_C}{N} \right) \right]^{0.5} \left(\frac{7800}{\rho_m} \right)^{0.33}$$

ρ_m : دانسیته گلوله (g/cm^3)

D_M : قطر آسیا (m)

ρ_f : دانسیته سیال (g/cm^3)

$d_{80,I}$: عبوری خوراک ۸۰٪ (m)

ρ_s : دانسیته خوراک (g/cm^3)

K : برای آسیای گلوله‌ای = ۰/۴۶ و برای آسیای میله‌ای = ۰/۶۹

N : سرعت (دور در دقیقه)

W_i : اندیس کار باند (kWh/t)

N_C : سرعت بحرانی (دور در دقیقه)

۹-۳-۱-۳- توان مؤثر در آسیا

○ توان مصرفی در آسیا به عوامل زیر بستگی دارد:

(۱) طول آسیا

(۲) حجم بار

(۳) سرعت

(۴) نوع آسیا

معادله محاسبه توان آسیا:

$$P = 8.44 D_M^{2.5} L K_L K_{SP}$$

K_{SP} : فاکتور سرعت

P : توان (kW)

L : طول آسیا (m)

D_M : قطر داخلی آسیا (m)

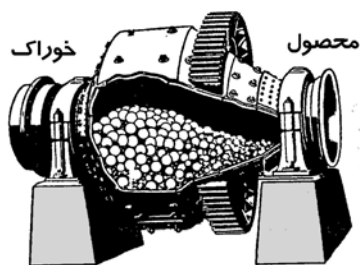
K_L : فاکتور بار

جدول ۹-۱- مقادیر فاکتور سرعت و فاکتور بار

| فاکتور بار: K_L | بار (%) | فاکتور سرعت: K_{SP} | سرعت (%) |
|-------------------|---------|-----------------------|----------|
| ۵/۲ | ۴۰ | ۰/۱۸ | ۷۴ |
| ۵/۴ | ۴۲ | ۰/۲ | ۸۰ |
| | | ۰/۲۲۵ | ۹۰ |

۹-۳-۲- آسیای گلوله‌ای Hardinage

- این آسیا با اضافه کردن یک قسمت مخروطی، با زاویه حدوداً ۳۰ درجه، به استوانه اصلی ساخته می‌شود.
- به دلیل نیروی گریز از مرکز، گلوله‌های بزرگ در نزدیک ورودی و گلوله‌های کوچک در نزدیکی خروجی تجمع پیدا می‌کنند.

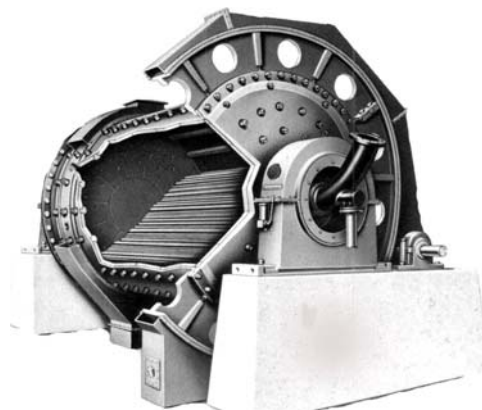


شکل ۹-۸- آسیای گلوله‌ای Hardinage

- وجود گلوله‌های بزرگ در نزدیک ورودی برای خردایش مواد مفید است، چون گلوله‌های درشت با ذرات درشت در تماس می‌باشد و در انتهای آسیا که ذرات کوچکتر شده‌اند با گلوله‌های کوچک در تماس هستند.

۹-۳-۳- آسیاهای میله‌ای (Rod Mills)

- ابعاد ذرات خوراکی به بزرگی ۵cm را به ۳۰ μm کاهش اندازه می‌دهد.



شکل ۹-۹- آسیای میله‌ای

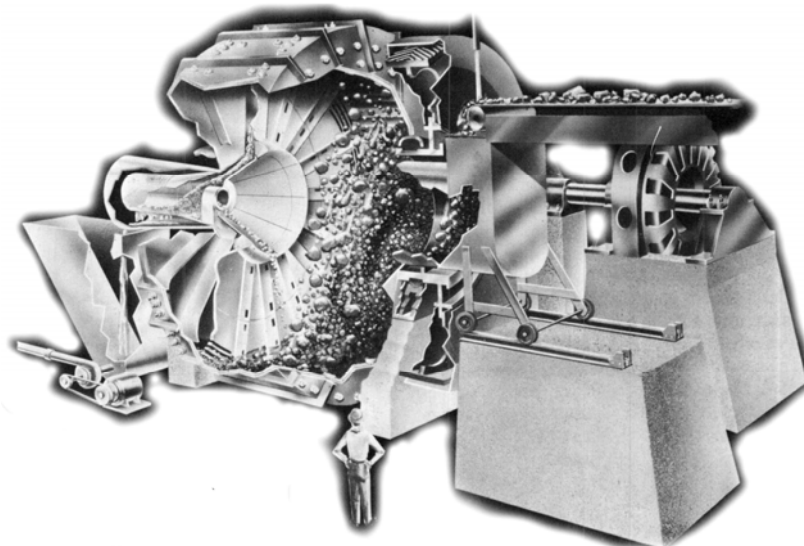
- چون میله‌های بلندتر از $6m$ معمولاً خم می‌شوند، این مسئله در تعیین بزرگترین طول آسیاهای میله‌ای دخیل می‌باشد.
- مصرف میله‌ها به مشخصات خوراک، سرعت آسیا، طول میله و اندازه ابعاد محصول بستگی دارد. مصرف میله‌ها معمولاً در دامنه $1-1/1$ کیلوگرم فولاد بر هر تن عملیات تر قرار دارد.
- ذرات درشت خوراک، میله‌ها را در ورودی از هم باز می‌کند و یک آرایش مخروطی به آن می‌دهد (شکل ۹-۱۰). این امر باعث می‌شود که نرم شدن روی مواد درشت صورت گیرد و نرمه کمتری تولید شود. به همین علت این نوع آسیاها در مدار باز به کار گرفته می‌شوند.



شکل ۹-۱۰- عمل خردایش توسط میله‌ها

۹-۳-۴- آسیاهای خود شکن و نیمه خود شکن (Autogenous and Semi Autogenous Mills)

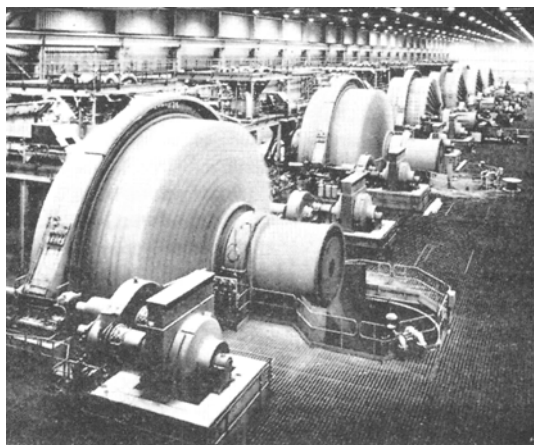
- مشخصه اصلی این نوع آسیاها، نسبت قطر به طول زیاد آنهاست (بیش از ۲).



شکل ۹-۱۱- آسیای خود شکن (نمای برشی)

- در اثر ترکهای موجود در سنگ، تکه‌های بزرگ زودتر شکسته می‌شوند.
- ذرات با اندازه‌هایی وجود دارند که آنچنان بزرگ نیستند که توسط نیروی وزن خودشان شکسته شوند، این اندازه ابعاد به اندازه بحرانی معروف هستند و در داخل آسیا تجمع پیدا می‌کنند. برای رفع این مشکل، یا

از آسیاهای نیمه خود شکن (Semi-Autogenous Mills) استفاده می‌شود یا این ذرات را جدا کرده و بطور مجزا سنگ‌شکنی می‌شوند.

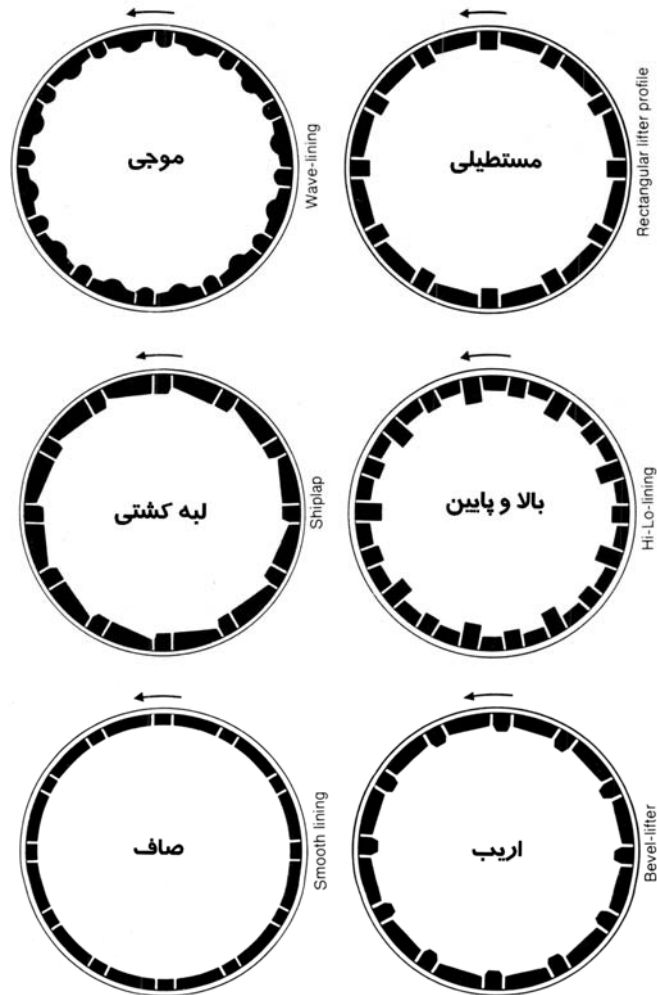


شکل ۹-۱۲- مجموعه‌ای از آسیاهای نیمه خودشکن

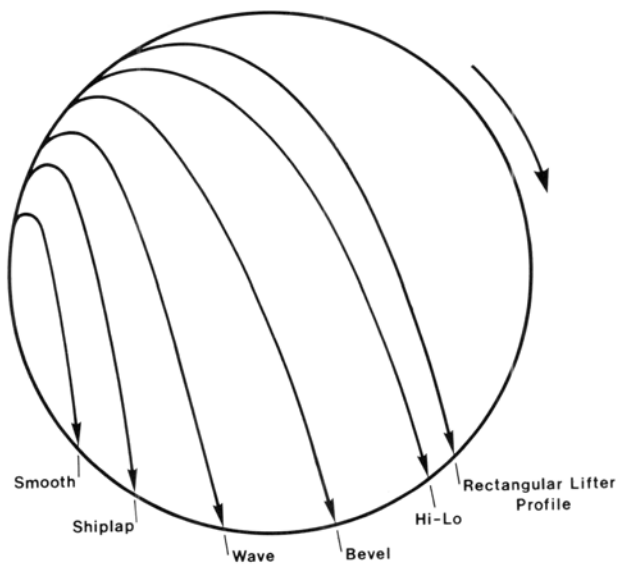
- در آسیای نوع نیمه خودشکن، مقدار بار گلوله‌ها بهترین اثر را در دامنه $6-10\%$ با احتساب فضای خالی دارد.
- برای سنگ‌معدنهایی که از دانه‌های خیلی محکم به هم پیوسته تشکیل شده‌اند، این نوع نرم کردن ممکن است به دلیل ایجاد نرمه مطلوب نباشد.

۹-۴- آستر (Liner)

- سطح داخل آسیاها شامل آسترهای قابل تعویض می‌باشند که بایستی ضربات را تحمل کرده و در مقابل سایش مقاوم باشند و مطلوب‌ترین حرکت بار را ایجاد کنند.
- آسترها معمولاً از فولاد منگنزدار یا کروم-مولیبدن که دارای مقاومت ضربه‌ای بالایی هستند، ساخته می‌شوند.
- آسترهای لاستیکی به جهت عمر زیاد، نصب آسانتر و صدای کمتر در مواردی جانشین آسترهای فولادی شده‌اند.
- هزینه آستر آسیاها یکی از عمده‌ترین هزینه‌ها در عملیات خردایش است.
- قطر آسترهای لاستیکی زیاد و در مقابل مواد شیمیایی مقاوم نیستند.
- مقاومت کم آسترهای لاستیکی در برابر نیروهای خیلی قوی، استفاده آنها را در نرم کردن اولیه محدود کرده است.



شکل ۹-۱۳- انواع آسترهای آسیای گردان



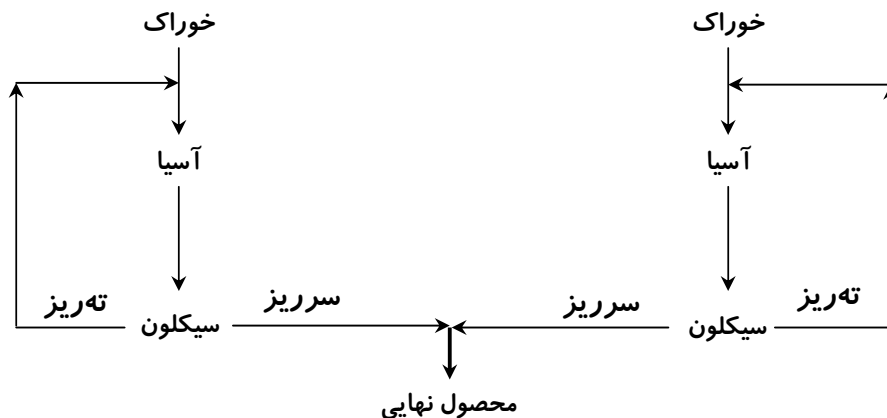
شکل ۹-۱۴- تأثیر نوع آستر در سقوط بار خرد کننده

۹-۵- مدارهای نرم کردن (Grinding Circuits)

- نرم کردن تر عموماً در کانه‌آرایی به جهت مزیت‌های زیر استفاده می‌شود:
 - (۱) مصرف کمتر انرژی به‌ازای هر تن محصول
 - (۲) ظرفیت بیشتر به‌ازای واحد حجم آسیا
 - (۳) امکان استفاده از عملیات سرد کردن تر برای کنترل دقیق اندازه ذرات محصول
 - (۴) حذف مسئله گرد و غبار
 - (۵) امکان استفاده از روشهای ساده انتقال و حمل و نقل، مانند پمپ و لوله
- مدارها به دو دسته بزرگ تقسیم می‌شوند:
 - (۱) مدار باز: بدون کنترل اندازه ذرات محصول (بدون بار در گردش)
 - (۲) مدار بسته: کنترل اندازه ذرات محصول (با بار در گردش)
- در مدار بسته، که عمدتاً در کانه‌آرایی از آن استفاده می‌شود هدف، خارج کردن مواد به محض رسیدن به اندازه مورد نظر می‌باشد.

۹-۵-۱- مدار نرم کردن موازی

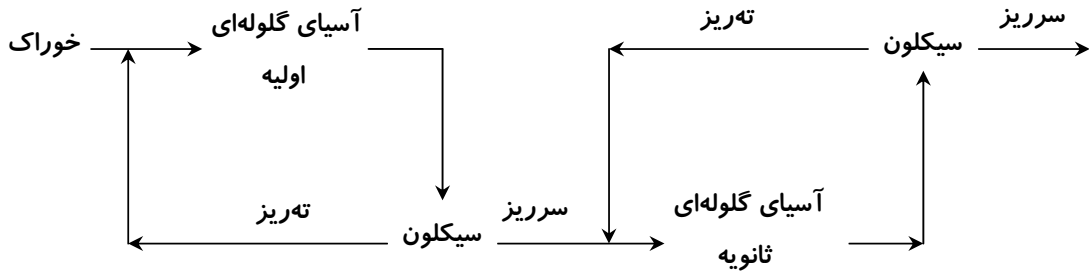
- در این مدار هر واحد می‌تواند بدون ایجاد اختلال در کار، از مدار خارج شود.



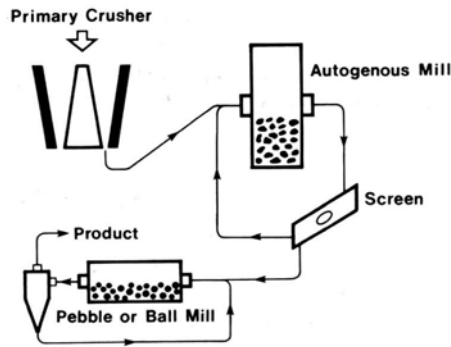
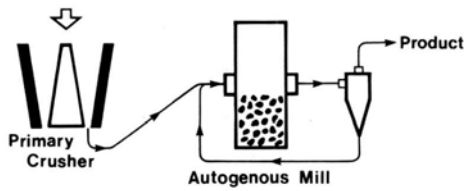
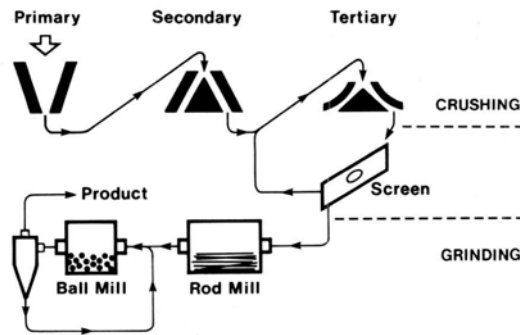
شکل ۹-۱۵- مدار آسیا کنی موازی

۹-۵-۲- مدار نرم کردن دو مرحله‌ای (سری)

- این مدار برای تولید محصول که به تدریج نرم می‌شود، کاربرد دارد.



شکل ۹-۱۶- مدار آسیا کنی سری



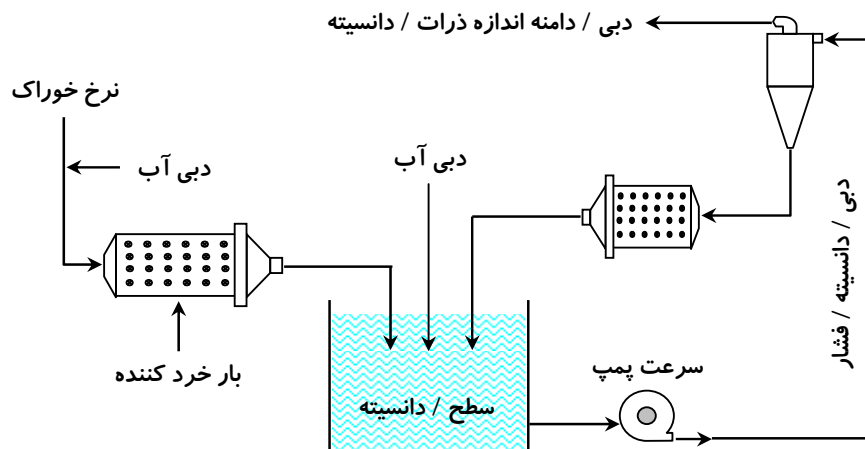
شکل ۹-۱۷- سه نوع اصلی مدارهای نرم کنی

۹-۶- کنترل مدارهای نرم کننده (Control of Grinding Circuits)

- پارامترهای اصلی که ممکن است با تغییر در نرخ خوراک جدید در کنترل مدار مؤثر باشند، بار در گردش، دامنه اندازه ذرات، سختی کانه و نرخ افزایش آب به مدار می‌باشد.

- نوسانات در اندازه و سختی خوراک مهمترین عامل برهم زنده موازنه مدار نرم کننده می‌باشند. این نوسانات می‌توانند از تفاوت در ترکیب کانی‌شناسی، اندازه ذرات قسمت‌های مختلف معدن و از تغییرات در دهانه سنگ‌شکنها به دلیل سایش و یا خراب شدن سرندهای مدارهای نرم کننده ناشی شود.
- اگر افزایش در اندازه ذرات یا سختی خوراک ایجاد شود، محصول درشت‌تری بدست خواهد آمد. مگر اینکه مقدار خوراک کاهش یابد.
- محصول درشت در آسیا باعث افزایش بار در گردش و دبی حجمی ورودی به سیکلون می‌شود که این خود دامنه اندازه ذرات محصول سیکلون را تغییر خواهد داد.
- کنترل بار در گردش، اثر مستقیمی بر روی ابعاد ذرات محصول خواهد داشت.
- کنترل مدار نرم‌کنی ممکن است با اهداف زیر انجام شود:
 - (۱) بالا بردن دبی مواد ورودی با حفظ اندازه ذرات محصول
 - (۲) فراهم کردن محصولی با اندازه ذرات مورد نظر در دبی مواد ثابت

۹-۶-۱- عوامل مؤثر در کنترل مدارهای نرم‌کنی



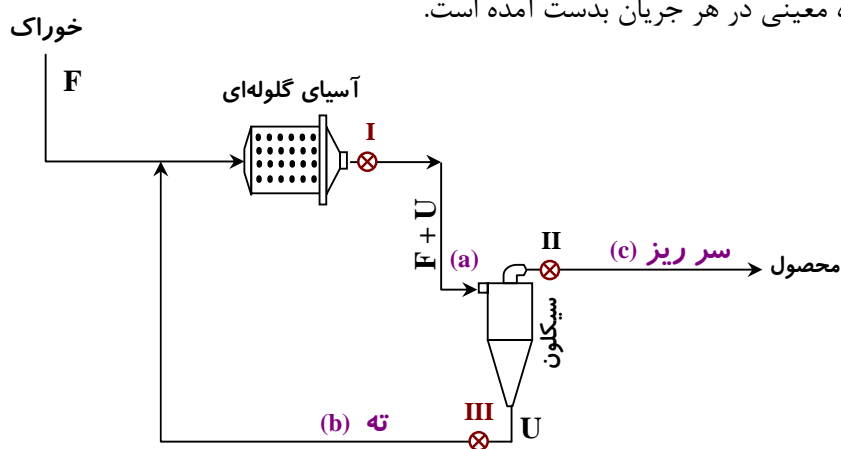
شکل ۹-۱۸- عوامل مؤثر در کنترل مدارهای نرم‌کنی

- از بین عوامل مختلف، تنها خوراک و نرخ آب اضافه شده بطور مستقل می‌توانند تغییر داده شوند. بقیه متغیرها به این دو بستگی دارد و در واقع به تغییرات این دو عامل عکس‌العمل نشان می‌دهند (در صورت دسترسی به پمپ با سرعت متغیر، آن نیز یک متغیر مستقل دیگر خواهد بود).
- در بعضی از عملیات‌های نرم‌کنی، مقدار بار داخل آسیا توسط دو میکروفون (Microphone)، یکی بالای منطقه برخورد بار به بدنه آسیا و دیگری پایین آن کنترل می‌شود.
- اگر بار به طرف میکروفون بالایی حرکت کند، نشان از اضافه شدن بار آسیا دارد.

- دانسیته پالپ نیز از طریق صدای میکروفون قابل کنترل می‌باشد. اگر دانسیته کم شود صدای برخورد بار به بدنه شدیدتر می‌شود.
- اندازه ذرات خروجی از سرریز سیکلون و بار در گردش دو عامل اصلی در کنترل مدارهای نرم‌کنی می‌باشند.

۹-۶-۲- اندازه‌گیری بار در گردش

- از طریق نمونه‌برداری از جریانهای پالپ، بار در گردش قابل محاسبه است.
- نمونه‌هایی از خروجی آسیای گلوله‌ای، ته‌ریز و سرریز گرفته شده و با آنالیز سرندی **a**، **b** و **c**، به ترتیب، درصد وزنی اندازه معینی در هر جریان بدست آمده است.

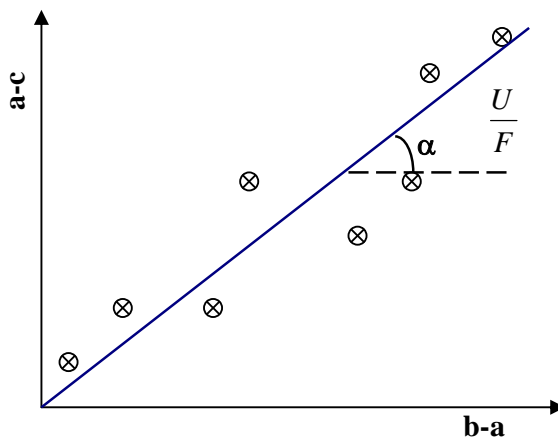


شکل ۹-۱۹- نمونه‌ای از یک مدار نرم‌کنی

- بنابراین موازنه جرم در سیکلون برای اندازه معینی از ابعاد ذرات عبارت است از:

$$(F + U)a = Fc + Ub$$

$$\text{نسبت بار در گردش} = \frac{U}{F} = \frac{a - c}{b - a}$$



شکل ۹-۲۰- نمودار a-c در مقابل b-a