

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# انواع آسیاب ها و خردایش در تولید صنعتی

## روکش های سطح

صادق مهویدی



## ۱- آسیاب های غلطکی (سه غلطکی) (Roller Mills)

آسیاب های سه غلطکی به طور عمده در صنایع روکش های سطح و جوهر های چاپ به منظور خردایش و دیسپرس کردن رنگ دانه ها در محمل ها مورد استفاده قرار می گیرند [۲۰،۱]. آسیاب های چهار و پنج غلطکی نیز در دسترس هستند اما به جز موارد نادری در صنعت چاپ از آنها در صنایع روکش و مواد رنگزا استفاده نمی شود. گونه های دیگری از آسیاب های غلطکی اکنون در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند؛ برای مثال آسیاب های تک غلطکی که در آنها ماده آسیاب شونده به کمک یک پره که در مقابل یک غلطک قرار دارد روی آن قرار گرفته و آسیاب می شود. در اینجا برای جمع آوری دانه های آسیاب نشده ای که در کنار غلطک فرو می ریزند از قیف های بزرگی که به یک مکنده اتصال دارند استفاده می شود. مکنده این ذرات آسیاب نشده را دوباره روی غلطک بازگردانده و آسیاب می شوند. کارایی این سیستم به طور قابل ملاحظه ای بالاست [3,4].

از سیستم های چند غلطکی نیز در مواردی که توقف کار باعث افت فشار دستگاه و ریزش ذرات آسیاب نشده از میان غلطک ها می شود، استفاده می گردد؛ در اینجا نیز با استفاده از قیف های مکنده دوباره

ذرات را روی غلطک‌ها باز می‌گردانند تا عملیات به طور کامل انجام شود. باید به این موضوع نیز اشاره کرد که مکانیسم حاکم بر تمامی این آسیابها از نوع سایشی (smearing) است

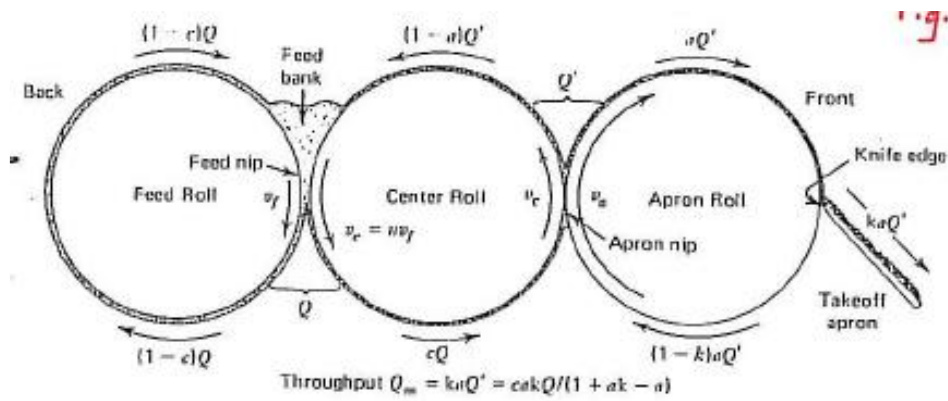
## ۱-۱- توصیف مکانیسم عملکرد آسیابهای سه غلطکی

فرایند آسیاب کردن در این آسیاب‌ها با وارد کردن مخلوط آسیاب (mill base) به فضای میان غلطک‌های تغذیه (feed) و مرکزی (center) آغاز می‌شود. این دو غلطک با سرعت‌های متفاوت به سمت یکدیگر (inwardly) در حال گردش هستند. صفحات انتهایی که در دو سوی غلطک‌ها قرار دارند مانع از پاشش مخلوط آسیاب به خارج و هدر رفتن آن می‌شوند. در اثر چرخش غلطک‌ها، مخلوط آسیاب به سمت ناحیه‌ای که تیغه ورودی (feed nip) نامیده می‌شود، کشانده شده و آسیاب می‌شود. از آنجایی که این ناحیه در اثر حرکت غلطک‌ها در حال باریک شدن است مقدار قابل ملاحظه‌ای از مخلوط در اثر فشار از آن خارج شده و به بالای سطح غلطک پرتاب می‌شود که مجدداً در اثر چرخش غلطک‌ها به سمت همدیگر وارد ناحیه تیغه ورودی شده و خرد می‌شود؛ این فرایند با تکمیل روند خردایش تدریجی ذرات ادامه می‌یابد [5,6].

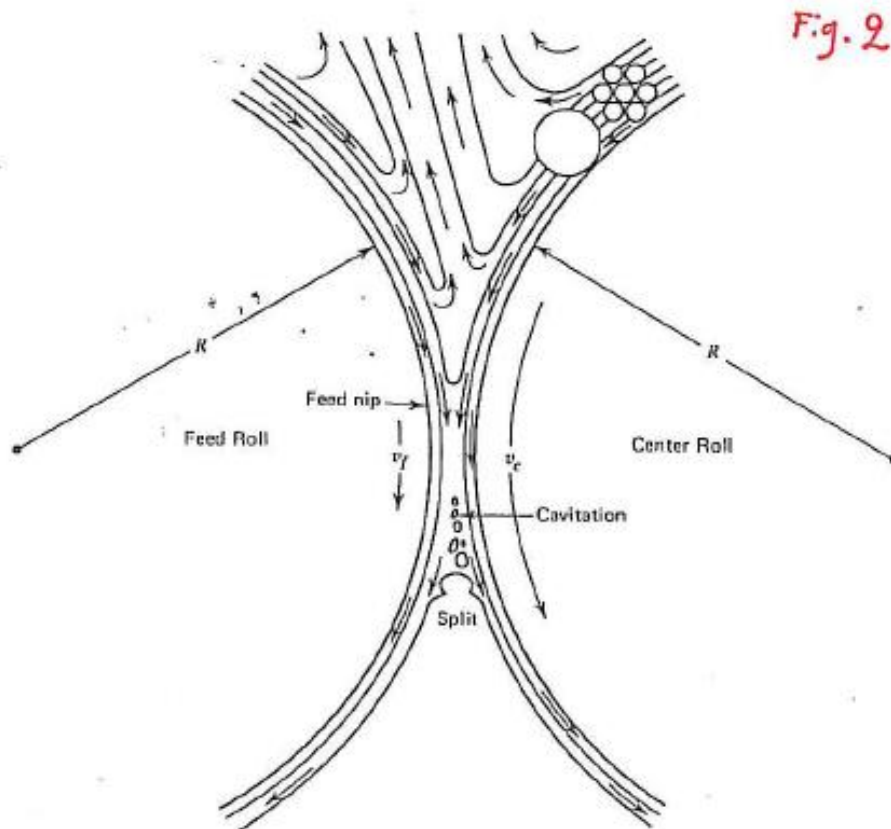
این الگوی چرخش روی شارژ تغذیه (feed bank) باعث ایجاد نیروهای برشی نسبتاً شدید (shear) می‌شود. شدیدترین حالت ایجاد نیروی برشی در تیغه ورودی به وجود می‌آید که باعث خردایش آن بخشی از مخلوط آسیاب می‌شود که وارد این ناحیه شده است.

در ابتدای ورود مخلوط آسیاب به تیغه ورودی در اثر ایجاد فشار زیاد و نیروی برشی، این مخلوط به دو جزء تقسیم می‌شود: یک جزء آن به سمت غلطک تغذیه بازگردانده شده و جزء دیگر به سمت غلطک مرکزی می‌رود. جزئی که به سمت غلطک تغذیه رفته به شارژ تغذیه تزریق شده و سپس مجدداً همانطور که گفته شد- به روی غلطک‌ها بازگردانده می‌شود اما جزئی که به سمت غلطک مرکزی کشیده می‌شود،

وارد تیغه پاک کننده (apron nip) می گردد که خود ما بین غلطک مرکزی و یک غلطک پاک کننده (apron roller) تعبیه شده است. روی تیغه پاک کننده مخلوط آسیاب تحت فشار و نیروی برشی به مراتب شدیدتری از تیغه ورودی قرار می گیرد. در اینجا نیز غلطک ها با سرعت های متفاوت به سمت یکدیگر می گردند. پس از عبور از تیغه پاک کننده باز هم یک تقسیم در مخلوط حاصل می شود و بخشی از آن به سوی غلطک مرکزی بازگشته و در شارژ ورودی وارد می شود و بخش دیگر به سوی غلطک پاک کننده می رود و به سمت تیغه برداشت (take off) هدایت می شود؛ در اینجا یک تیغه چاقو مانند با اعمال فشار روی غلطک، حجم آسیاب شده را از روی آن برداشت می کند.



شمای ۱: برش عرضی یک آسیاب سه غلطکی



شمای ۲: الگوی حرکت مخلوط آسیاب در ناحیه تغذیه

## ۲-۱- موازنه جرم در آسیابهای سه غلطکی

برای نوشتن موازنه جرم روی سیستم آسیاب سه سه غلطکی باید دو پیش فرض را در نظر گرفت: یکی آنکه حالت تعادل حاصل شده و دیگر آنکه میزان ماده ورودی به تیغه ورودی از شارژ تغذیه با میزان ماده برداشت شده به وسیله تیغه برداشت، دارای آهنگ یکسانی است.

در این صورت  $Q$  نمایانگر آهنگ ورود مخلوط آسیاب به تیغه ورودی،  $C$  نشان دهنده آن جزئی از  $Q$  می باشد که به سمت غلطک مرکزی می رود (بدیهی است جزء دیگر که به سمت غلطک تغذیه باز می گردد 1-c خواهد بود).

$Q'$  آهنگ ورود مخلوط آسیاب به تیغه پاک کننده را نشان می دهد که جزئی از آن ( $a$ ) به سمت غلطک پاک کننده رفته و جزء دیگر ( $1-a$ ) به سمت غلطک مرکزی باز می گردد. در نهایت  $k$  نیز مقدار ماده آسیاب شده ای است که با تیغه برداشت از روی غلطک پاک کننده جدا می شود.

در حالت تعادل آهنگ مخلوط ورودی به ناحیه تیغه ورودی باید با آهنگ خروج آن برابر باشد زیرا در غیر این صورت، مخلوط آسیاب در آن ناحیه تجمع می کند. معادله حاصل از تعادل در تیغه ورودی به صورت زیر خواهد بود.

$$(1 - c)Q + kaQ' + (1 - a)Q' = (1 - c)Q + cQ$$

باید به این نکته توجه داشت که میزان مخلوط آسیابی که از سیستم سه غلطکی خارج می شود معادل  $kaQ'$  بوده که به وسیله شارژ مجدد مخلوط به داخل غلطک ها جبران می شود. در صورتی که معادله حاصل از تعادل بر حسب  $Q'$  حل شود معادله زیر را به دست می دهد:

$$Q' = \frac{cQ}{1 + ak - a}$$

با جایگزینی این مقدار  $Q'$  در معادله اتلاف مخلوط در غلطک ها ( $kaQ'$ ) می توان میزان اتلاف ا شارژ جدد مخلوط آسیاب در سیستم سه غلطکی را بر حسب شارژ ورودی مخلوط ( $Q$ ) و اجزای انتقال ( $c, a, k$ ) به دست آورد:

$$Q_m = kaQ' = \frac{cakQ}{1+ak-a}$$

در شرایط ایده آل کاری تیغه برداشت ( $k$ ) معادل ۱ در نظر گرفته می شود؛ یعنی این تیغه تمامی مخلوط آسیاب شده را از روی غلطک پاک کننده برداشت می کند با این حساب ( $k=1$ ) معادله بالا به صورت زیر ساده می شود:

$$Q_m = caQ$$

از این معادله به طور واضح می توان وابستگی میزان تولید دستگاه به شارژ ورودی و نیز میرانی از آن شارژ که به سمت غلطک های مرکزی و پاک کننده می روند را دریافت.

### ۱-۳- تعیین جزئی از شارژ ورودی که به سمت غلطک مرکزی می رود (c)

در صورتی که غلطکهای مرکزی و تغذیه با سرعت های یکسانی بگردند میزان مساوی از شارژ ورودی روی هر یک از آنها می رود و در این حالت  $c=0.50$  در نظر گرفته می شود. اگر یکی از غلطکها با سرعت بیشتری نسبت به دیگری بچرخد میزان بیشتری از شارژ ورودی را به خود خواهد کشید. برای تعیین مقدار  $c$  باید پیش فرضهای زیر در نظر گرفته شود:

سرعت گردش غلطک تغذیه با  $v_f$  و غلطک مرکزی با  $v_c$  نمایش داده می شود و نسبت سرعت آنها نیز  $n$  در نظر گرفته می شود. یعنی  $n = \frac{v_c}{v_f}$  یا  $v_c = nv_f$ . اکنون با فرض اینکه میزان انتقال شارژ ورودی روی هر یک از غلطکها متناسب با سرعت گردش آنها باشد می توان نوشت: [7-10].

$$c = \frac{v_c}{v_c+v_f} = \frac{nv_f}{nv_f+v_f} = \frac{n}{1+n}$$

این رابطه با تعریف خوبی در مورد تمامی آسیابهای سه غلطکی جواب می دهد اما در صنعت از معادله زیر که بر اساس داده های تجربی و آزمون و خطا به دست آمده استفاده می شود که دقت آن از دقت معادله قبلی که حاصل داده های تئوری بود، بالاتر است.

$$c = \frac{n^2(n+3)}{(n+1)^3}$$

طبق این رابطه میزان انتقال شارژ ورودی روی غلطک مرکزی از پانچ در تئوری انتظار می رود تا حدودی بالاتر است. به فرض اگر  $n=3$  در نظر گرفته شود یعنی سرعت گردش غلطک مرکزی ۳ برابر غلطک تغذیه باشد، با استفاده از معادله تئوری میزان 0.75 از شارژ ورودی روی غلطک مرکزی می رود حال آنکه این مقدار بر اساس معادله تجربی 0.84 می شود. (در صورتی که  $n=1$  باشد هر دو معادله مقدار  $C$  را معادل 0.5 به دست می دهند).



از آنجا که با بالا رفتن نسبت سرعت غلطکها میزان تولید هم بالا می رود، تمایل کلی در صنعت بر ساخت آسیابهای سه غلطکی با مقدار بالاتر از  $n$  (مثل ۲ یا ۳) قرار دارد؛ اما این افزایش سرعت باید کنترل شود چون با افزایش مقدار  $n$  سرعت گردش غلطک ها نسبت به هم به صورت پله ای بالا می رود و سرعت غلطک پاک کننده به قدری زیاد می شود که به علت افزایش نیروی گریز از مرکز مخلوط آسیاب از روی آن به بیرون پرتاب می شود. امروزه برای آسیابهای سه غلطکی متداول (قطر ۱۲ اینچ و طول استوانه ۳۰ میلیمتر) سرعتهای 35 rpm برای غلطک تغذیه، 105 rpm برای غلطک مرکزی و 315 rpm برای غلطک پاک کننده در نظر گرفته می شود. در این شرایط نسبت سرعت هر یک از غلطک ها به دیگری معادل ۳ است ( $n=3$ ). برای محاسبه جزئی از شارژ ورودی که روی غلطک پاک کننده می رود ( $a$ ) نیز مسیری مشابه محاسبه  $c$  طی می شود.

## ۱-۴- آهنگ جریان ورودی در تیغه ورودی (Q)

مخلوط آسیابی که از دهانه تیغه ورودی وارد فضای بین غلطکهای تغذیه و مرکزی می شود را می توان به شکل یک نوار به طول  $L$  که معادل طول موثر غلطک بوده و ضخامت  $X$  که معادل طول تیغه ورودی است، در نظر گرفت. این مخلوط بین دو غلطکی که در حال گردش هستند خرد می شود؛ سرعت گردش این نوار فرضی معادل سرعت متوسط گردش دو غلطک خواهد بود بر این اساس می توان آهنگ ورود شارژ ورودی به فضای بین دو غلطک را به صورت زیر نوشت:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{Lx(V_c + V_f)}{2}$$

از آنجا که قبلاً گفته شود  $V_c = nV_f$  است و معادله بالا به صورت زیر ساده می شود:

$$Q = \frac{LxV_f(1 + n)}{2}$$

در صنایع روکشهای سطح و جوهرهای چاپ Q با واحد gal/hr، L با واحد inch،  $V_f$  با واحد rpm قطر غلطک با واحد inch و X با واحد mil بیان می شوند. از لحاظ تئوری و آزمایشگاهی نیز ثابت شده که سرعت متوسط چرخش نوار در بین دو غلطک حدود 1.15 برابر سرعت متوسط چرخش آنها می باشد؛ با اعمال این اصلاحات و در نظر گرفتن نتایج عملی معادله زیر حاصل می شود:

$$Q = 4.7 \times 10^{-4} DLx.rpm(1 + n)$$

در این معادله Q شارژ ورودی مخلوط آسیاب به  $gal.hr^{-1}$ ، L و D به ترتیب طول و قطر استوانه غلطک به inch و X نشان دهنده طول تیغه ورودی به mil است. rpm نیز سرعت چرخش غلطک تغذیه را نشان می دهد.

## ۱-۵- آهنگ جریان مخلوط آسیاب شونده در کل آسیاب

طبق آنچه گفته شد میزان اتلاف مخلوط در غلطک ها که با میزان شارژ مجدد برابر است با معادله  $Q_m = caQ$  داده می شود. در صورت جایگزینی Q از معادله بالا در این معادله ای حاصل می شود که به معادله نرخ تولید آسیاب معروف است:

$$Q_m(qal.hr^{-1}) = 4.7 \times 10^{-4} DLx.rpm(1 + n)ca$$

این معادله نرخ تولید را به صورت عددی عرضه می کند اما اطلاعاتی در مورد کیفیت محصول آسیاب شده به دست نمی دهد. اینگونه فرض می شود که کیفیت محصول آسیاب شده به میزان و نوع کاری که حین آسیاب شدن روی آن انجام می شود بستگی دارد. [11,12]

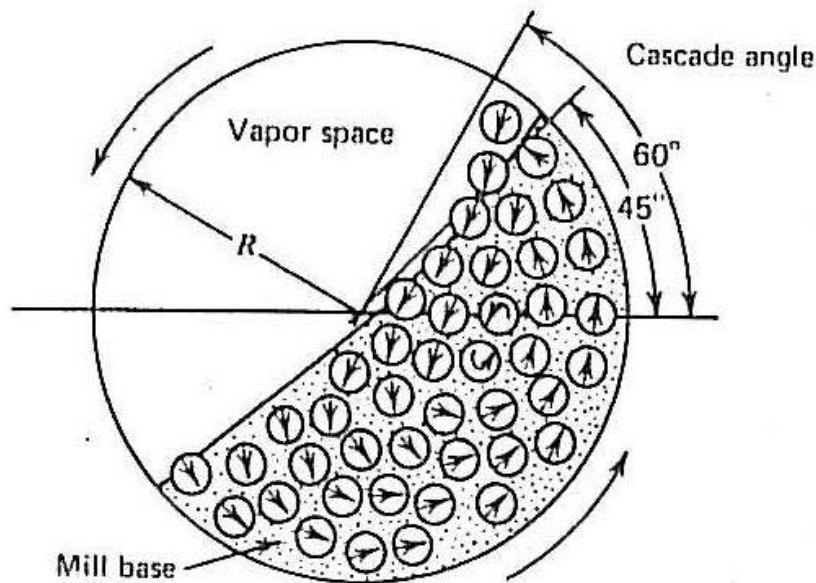
## ۲- آسیابهای گلوله ای و ریگی

### (Ball and Pebble Mills)

آسیاب گویچه ای یا شنی از یک ظرف استوانه ای شکل تشکیل شده که معمولاً به صورت افقی قرار گرفته و درون آن با ذرات ریگ یا گوی های سرامیکی یا فلزی پر شده است به این گلوله ها محمل خردایش (grinding medium) گفته می شود. [۱۸-۱۳] پس از شارژ مخلوط آسیاب عمل خردایش رنگدانه ها همزمان با گرداندن ظرف استوانه ای حول محور افقی آن انجام می شود. سرعت گردش به حدی است که ذرات ریگ یا گلوله ها بتوانند از سمت بالای ظرف به سمت پائین آن حرکت کرده و با مخلوط آسیاب برخورد کنند؛ این حرکت، حرکت آبشاری (cascade) نامیده می شود. برای جلوگیری از لغزش یا به عقب برگشتن مخلوط آسیاب روی دیواره پائینی در حین چرخش استوانه معمولاً در آسیابهای گلوله ای از baffle به صورت میله های فلزی و در آسیابهای ریگی از بلاکهای سرامیکی استفاده می شود.

در نتیجه این حرکت آبشاری، ذرات مخلوط آسیاب اعم از رنگدانه ها یا مواد رنگزا در میان باران گلوله ها محبوس شده و تحت ضربه و نیروهای برشی توأمان قرار می گیرند؛ با تکرار این حرکت عمل آسیاب کردن به خوبی انجام می شود.

در صنایع روکش های سطح و جوهر های چاپ، آسیاب ریگی (pebble mill) به آسیاب هایی گفته می شود که محمل خردایش آن از سرامیک ساخته شده باشند (مثل سنگ ریزه یا گلوله های چینی) و سطح داخلی آن با روکشی غیر فلزی مثل چینی یا پلاستیک پوشانده شده باشد. در مقابل آسیاب های گلوله ای (ball mill) آسیابی هایی هستند که در آن محمل خردایش و روکش سطح درونی هر دو فلزی باشند مثل گلوله های آهنی یا نیکل - کربن و روکش های فولادی. از آنجایی که مکانیسم عمل آسیاب کردن در هردوی این آسیابها یکسان است، آنها را در کنار هم مورد بررسی قرار میدهند با این توضیح که اصطلاح آسیاب گلوله ای، شامل آسیابهای ریگی نیز می شود یا در واقع آسیابهای ریگی زیر مجموعه ای از آسیابهای گلوله ای به شمار می روند.



شمای ۳: نمایی از حرکت آبشاری

## ۱-۲- معایب و مزایای آسیابهای گلوله ای

آسیابهای گلوله ای برای صنایع مواد رنگزا و جوهرهای چاپ مزایای زیادی دارند و قادر به آسیاب

اکثر رنگدانه ها از جمله رنگدانه های سخت آسیاب و دسپرس شونده هستند؛ [19,20]

۱- در این آسیابها نیازی به میکس اولیه نبوده که این خود از لحاظ اقتصادی بسیار به صرفه است. در

بسیاری از آسیابها مخلوط اولیه را قبل از ورود به آسیاب تحت میکس اولیه قرار می دهند اما در

اینجا مخلوط آسیاب حاوی رنگدانه ها به صورت مستقیم وارد ظرف شده و عملیات آغاز می

شود.

۲- در این سیستم میزان اتلاف مواد فرار و آلودگی حاصل از آنها به حداقل می رسد. چون تمام

عملیات در استوانه در بسته انجام می گیرد و فقط در زمانهای پر و خالی کردن ظرف مقداری از

مواد فرار وارد محیط می شوند.

۳- جهت نظارت بر عملیات آسیاب کردن به نیروی متخصص نیاز چندانی نیست زیرا ابزار به کار گرفته شده در این فرایند ساده و ایمن هستند. از همین روی هزینه های مربوط به دستمزد نیروی کار کاهش می یابد.

۴- هزینه های نگهداری و تعمیرات عموماً پائین هستند.

۵- آسیاب های گلوله ای عموماً قار به خردایش مخلوط اکثر رنگدانه ها و ذرات مواد رنگزا اعم از نرم یا سخت و ریز یا درشت می باشند و فقط در مورد سیستم های با وسیکوزیته بسیار بالا نمی توان از آنها استفاده کرد.

۶- استاندارد سازی در آسیاب های گلوله ای به راحتی انجام می شود و نتایج حاصل از داده های آزمایشگاهی را می توان در فرآیندهای صنعتی با اندکی تغییرات به کار برد.

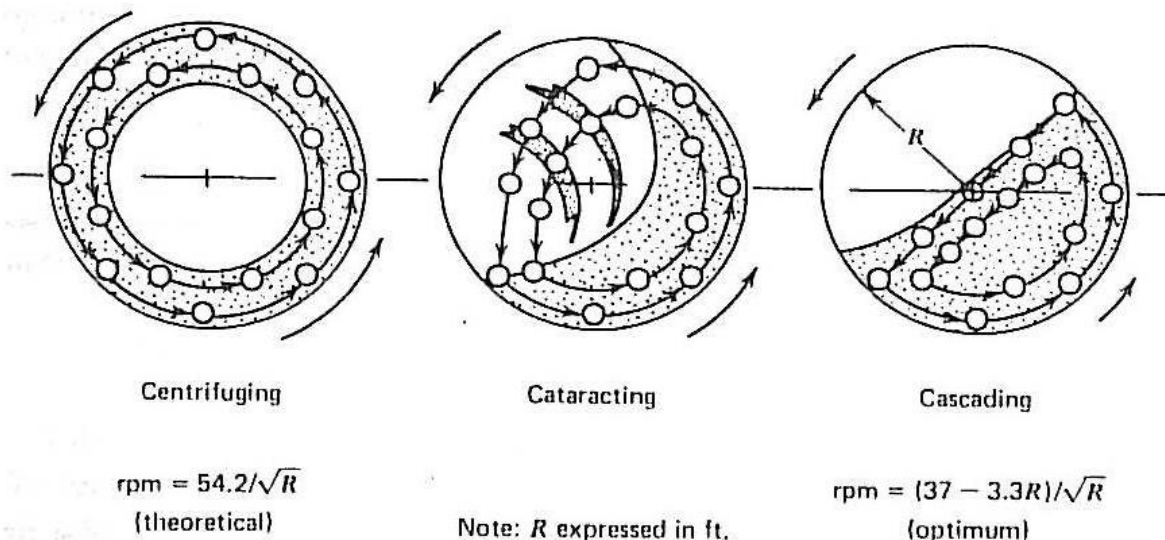
۷- نسبت ماده آسیاب شده نهایی به مخلوط اولیه در این آسیابها بسیار بالا است. (از ۵:۱ تا ۸:۱) در حالی که در سایر آسیاب ها این نسبت از ۳:۱ تجاوز نمی کند. [21]

۸- توانایی آسیابهای گلوله ای در کاهش اندازه ذرات مواد رنگزا و رنگدانه ها بسیار بالاست که خود باعث نمایش رنگ و یا پشت پوشی محصول آسیاب شده نهایی می شود. به بیان دیگر آسیابهای گلوله ای توزیع اندازه ذرات را به سمت اندازه ذرات اپتیمم پیش می برند.

۹- درک تکنولوژی و مکانیسم درگیر در این فرایند بسیار ساده است که باعث سهولت طراحی در مورد اکثر مخلوط های آسیاب شونده می گردد.

از جمله مهمترین معایب این سیستم ها می توان به دشواری هنگام خالی کردن آسیاب و نیز عدم انعطاف پذیری در طراحی و تعیین زمان و حجم ماده آسیاب شونده اشاره کرد؛ این آسیاب ها برای دستیابی به محصول نهایی با اندازه ذرات مطلوب به زمان عملکرد زیادی (تا حدود چندین ساعت) نیاز دارند و حجم مورد آسیاب صرفاً به حجم استوانه آنها محدود می شود.

با توجه به تمامی مزایای مطرح شده، آسیاب های گلوله ای به طور فزاینده ای در صنعت روکش های سطح و جوهرهای چاپ استفاده می شوند. از دهه ۱۹۵۰ به بعد نیمی از محصولات روکش سطح و جوهر چاپ در ایالات متحده به این روش آسیاب می شوند و در سالهای اخیر استفاده از این سیستم تا حدودی محدود شده اما مزایای آن به حدی بالاست که به هیچ عنوان نمی توان از آن چشم پوشی کرد.



شمای ۴: ویژگی های حرکات سانتریفوژ، فواره ای و آبشاری

## ۲-۲- عوامل فیزیکی موثر بر کارایی آسیابهای گلوله ای

عمده ترین عوامل موثر بر کارایی آسیابهای گلوله ای حاصل از سه مورد اصلی استوانه آسیاب مثل قطر و نیز سرعت گردش، گلوله های آسیاب کننده مثل اندازه، دانسیته، قطر و شکل (کروی، استوانه ای و...) و مخلوط آسیاب همانند حجم شارژ شونده، ویسکوزیته، دانسیته و ترکیب درصد آن، می باشد.

## ۲-۲-۱- حجم آسیاب و سرعت بهینه چرخش

سرعت بهینه چرخش یک آسیاب گلوله ای بر حسب rpm به طور کستقیم به شعاع استوانه آسیاب وابسته است؛ ابتدا باید مسیر طی شده توسط یک گلوله فرضی در یک آسیاب نیمه پر را در نظر گرفت؛ تحت سرعت های زاویه ای پائین این گلوله به تدریج در یک طرف آسیاب به طرف بالا برده می شود. در نهایت گلوله به نقطه ای می رسد که دیگر از پائین حمایت نشده و تحت یک حرکت آبشاری به همراه سایر گلوله ها به طرف پائین سرازیر می شود. (cascading)

در صورت افزایش سرعت زاویه ای استوانه، گلوله مورد نظر به نقطه ای می رسد که دیگر سرازیر نشده بلکه تمایل به پرتاب شدن در فضای خالی استوانه (vapor space) در آن ایجاد می شود. این اتفاق هنگامی رخ می دهد که گلوله به سطح خارجی مجموعه گلوله ها برسد. این حرکت به اصطلاح حرکت فواره ای (catracting) نام دارد.

با افزایش بیشتر سرعت زاویه حرکت گریز از مرکز (centrifuging) بدل به پدیده غالب شده و در حین چرخش، گلوله ها را با فشار به سطح داخلی استوانه می چسبانند.

در آسیاب های گلوله ای باید از حرکات گریز از مرکز یا فواره ای اجتناب کرد چون این حرکات بازده کلی فرایند را پائین می آورند. در حالت گریز از مرکز اساسا هیچ گونه آسیاب شدنی رخ نمی دهد چون مجموعه کل گلوله ها ثابت نگه داشته اند. حرکت حفاره ای نیز به نوعی ضربه ها و نیروی برشی را افزایش می دهد که علاوه بر نامناسب بودن شرایط آسیاب باعث تخریب گلوله ها و نیز سطح داخلی آسیاب می شود. پس در واقع تنها این حرکت آبشاری است که باعث ایجاد دسپرسیون مناسب رنگدانه ها و نیز مواد رنگزا در اثر آسیاب می شود. هدف اصلی در آسیابهای گلوله ای نیز رسیدن به همین مرحله است.

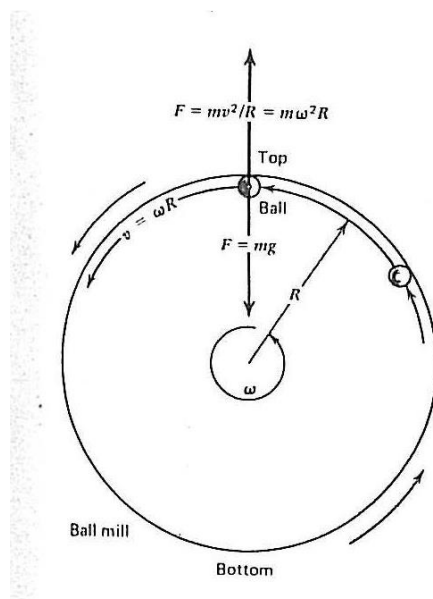
[22,23]

اپراتورهای با تجربه ای که با آسیاب های گلوله ای کار می کنند قادرند با گوش دادن به صدای دستگاه مقدار rpm آن را حدس زده و rpm مناسب برای دستیابی به شرایط حرکت آبخاری را تخمین بزنند؛ صدای غرش گونه پایه (steady rumble) نشانه ایجاد شرایط حرکت آبخاری است حال آنکه با افزایش صدا می توان گفت که حرکت فواره ای ناخواسته در حال رخ دادن است. علت این صدای زیاد نیز برخورد مداوم گلوله ها به یکدیگر و نیز به سطح داخلی استوانه آسیاب است. اگر از دستگاه صدایی به گوش نرسد و یا خیلی ضعیف باشد بدان معناست که ویسکوزیته مخلوط آسیاب بسیار بالا بوده و جلوی حرکت گلوله ها را گرفته است. به این حالت اصطلاحاً مخلوط خفه شده (choked mixture) گفته می شود.

برای محاسبه میزان rpm لازم برای ایجاد حرکت آبخاری باید ابتدا rpm لازم برای حفظ یک گلوله فرضی در حالت سانترفیوژ را محاسبه کرد: فرض می شود که یک گلوله فرضی باید در حین حرکت چرخشی به دور محیط داخلی استوانه آسیاب در بالاترین نقطه مسیر خود ثابت بماند یعنی باید بین نیروی گریز از مرکز که به سمت بیرون عمل می کند و نیروی جاذبه که به سمت درون عمل می کند تعادل برقرار شود پس:

$$f_{centerfugal} = f_{gravitiamal}$$

$$\frac{mV^2}{R} = mg$$





سرعت گلوله معادل  $V$  بوده و سرعتى که لازم است گلوله را در بالاترين نقطه مسير در چرخش نگه

دارد با  $V_c$  نمايش داده مى شود؛ از معادله بالا مى توان نتيجه گرفت:

$$V_c = \sqrt{gR}$$

$R$  شعاع استوانه آسياب است. از رابطه سرعت زاويه اى براى جاىگزينى  $V_c$  استفاده مى شود:

$$V_{angular} = \frac{2\pi R}{60} rpm$$

با جاىگزينى اين رابطه در رابطه بالا مقدار  $rpm$  لازم براى حفظ گلوله در حالت سانتيفيوژ به دست

مى آيد:

$$rpm_c = \frac{60}{2\pi r} \sqrt{gR}$$

اگر  $R$  بر اساس فوت (ft) بيان شود  $g$  برابر با  $32.2 \text{ ft/sa}^2$  خواهد بود و رابطه به شكل زير ساده

مى شود:

$$rpm_c = \frac{54.2}{\sqrt{R}}$$

اين همان  $rpm$  بحراني است که براى حفظ حالت گريز از مرکز ضرورى مى باشد و با افت اين سرعت

زاويه اى يکى از دو حالت حرکت فواره اى يا آبشارى رخ ميدهند. (شماى ۵)

بر اساس اطلاعات به دست آمده از سازندگان آسيابهاى گلوله اى مقدار  $rpm$  بهينه براى ايجاد حرکت

آبشارى و در نتيجه بهترين حالت آسياب کردن ممکن به  $rpm$  بحراني لازم براى حفظ حرکت گريز از مرکز

وابسته است. رابطه زير ارتباط اين دو  $rpm$  را بر اساس داده هاى تجربى به دست مى دهد؛

$$rpm_0 = (0.68 - 0.06R)rpm_c$$

$rpm_0$  سرعت زاويه اى بهينه براى ايجاد حرکت آبشارى است. با جاىگزينى  $rpm_c$  از معادلات قبلى به

رابطه اى مى رسيم که  $rpm_0$  را فقط بر حسب  $R$  شعاع استوانه آسياب (ft) بيان مى کند:

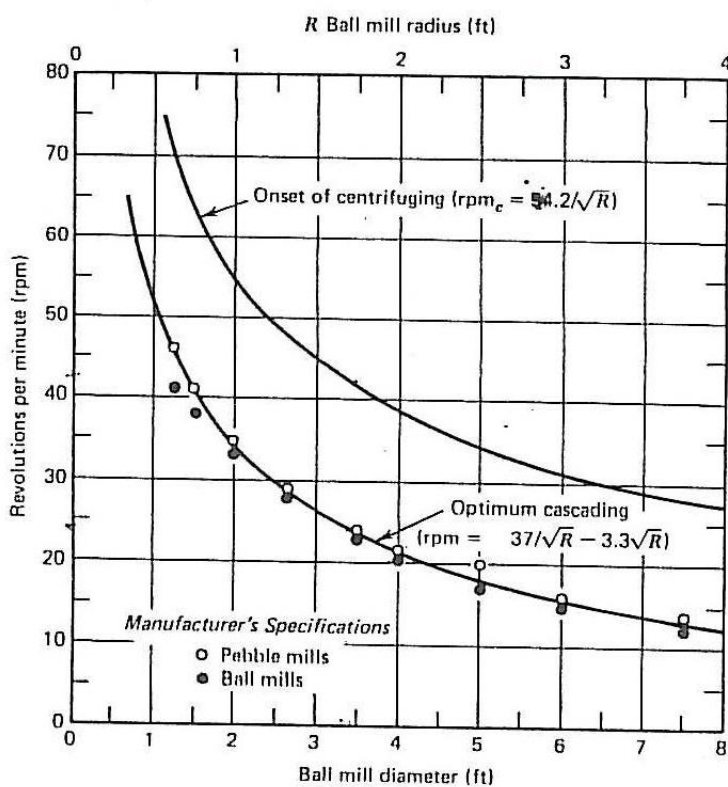
$$rpm_0 = \frac{37 - 3.3R}{\sqrt{R}} = \frac{37}{\sqrt{R}} - 3.3\sqrt{R}$$

مقادیر  $rpm_c$  و  $rpm_0$  بر حسب شعاع های استوانه آسیاب از 1ft تا 4ft به صورت جداول و نمودارها

ارائه شده و در دسترس هستند. [24]

جدول ۱: مقادیر rpm بحرانی و بهینه بر حسب شعاع گویچه ها

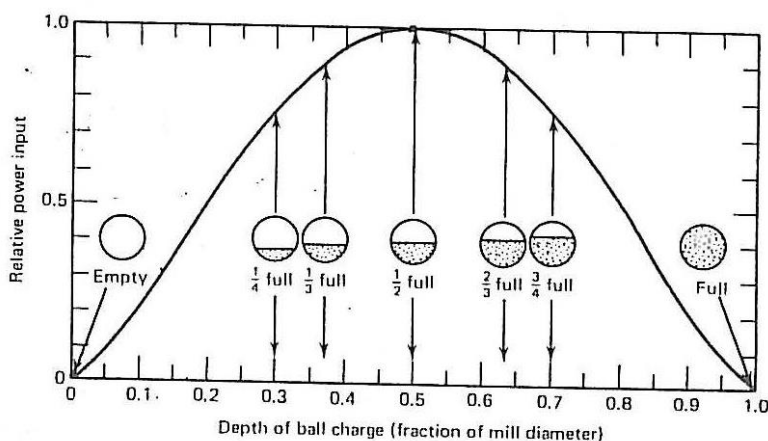
Ball Mill Dimensions		Critical Centrifuging, rpm, $rpm_c$ (Eq. 5)	Optimum Cascading rpm, $rpm_0$ (Eq. 7)
Radius (ft)	Diameter (ft)		
0.50	1.00	76.6	50.0
1.00	2.00	54.2	33.7
1.50	3.00	44.3	26.2
2.00	4.00	38.4	21.5
2.50	5.00	34.3	18.2
3.00	6.00	31.3	15.6
3.50	7.00	29.0	13.6
4.00	8.00	27.1	11.9



شمای ۶: نمودار حاصل از جدول ۱

## ۲-۲-۲- میزان پرکردن بهینه آسیاب با گلوله ها

پرکردن استوانه آسیاب تا نیمه با گلوله ها معمولترین و متداولترین حالت پرکردن آسیابهاست. این نحوه پر کردن بر اساس بررسی های تئوریک صورت گرفته است زیرا در این حالت حرکت آبشاری گلوله ها به صورت آزادانه در روی تمام قطر استوانه انجام می شود. از سوی دیگر در این حالت، توان ورودی به آسیاب به حداکثر مقدار خود می رسد. توان ورودی به آسیاب با دور شدن از این مقدار کمتر شده و در حالت کاملا خالی و کاملا پر به صفر می رسد و در نتیجه از کیفیت و مقدار آسیاب شده مخلوط کم می شود. هر از گاهی به دلایل مختلف، مثل وارد کردن میزان بیشتری از مخلوط آسیاب در خط تولید، آسیابها در حد کمتری از 50% پر می شوند. کاهش شارژ مخلوط اولیه از 50% به 1/3 باعث کاهش 10% در کیفیت و مقدار آسیاب شدن محصول نهایی می شود. در شارژهای کمتر از 30%، مجموعه گلوله ها روی دیواره داخلی آسیاب لغزیده و ضمن کاهش محسوس میزان آسیاب باعث آسیب دیواره داخلی می شود. در شرایط صنعتی آسیابها را تا نیمه از گلوله های فلزی و تا مقدار 1/3 از گلوله های سرامیکی پر می کنند؛ اما هر از گاهی هنگام استفاده از گلوله های سرامیکی برای جلوگیری از احتمال تخریب (هر چند جزئی) روکش درونی، اندکی از شارژ نیمه نیز فراتر می روند اما این حد اضافه از 5% تجاوز نمی کند.



شمای ۷: مقدار توان ورودی مورد نیاز برای عملکرد آسیاب در حالات مختلف پرشدن

## ۲-۳- انواع محمل‌های آسیاب کننده

سه گونه عمده از محمل‌های آسیاب کننده وجود دارد که عبارتند از: ریگ‌های چخماقی (flint pebbles)، گلوله‌های چینی معمولی یا با چگالی بالا و گلوله‌های فلزی (فولادی یا غیر فولادی)

### ۲-۳-۱- گلوله‌های سرامیکی

ریگ‌های چخماقی طبیعی با چگالی حدود  $2.6 \text{ g/cm}^3$ ، قدیمی‌ترین نوع مواد آسیاب کننده هستند که تا به امروز موارد استفاده خود را از دست نداده‌اند. بهترین سنگ چخماق در سواحل نورماندی فرانسه یافت می‌شود که فوق العاده سخت و دارای ماندگاری طولانی است اما به علت این که از منابع طبیعی به دست می‌آید شکل هندسی دقیقی ندارد که خود باعث پائین آمدن کارایی آسیاب می‌شود و از طرفی به علت رنگشان ممکن است باعث ایجاد ته رنگ خاکستری در دیسپرسونهای روشن شوند.

گلوله‌های چینی سنتزی معمولی با چگالی  $2.3 - 2.4 \text{ g/cm}^3$  امروزه بیش از سایر مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. این گلوله‌ها کاملاً سفید، شیشه‌ای شده (vitrified) و به شکل کروی هستند. این کره‌ها در حین فرآیند آسیاب کردن در برابر تغییر شکل دادن یا شکستن مقاوم بوده و طول عمر بالایی هم دارند. اخیراً گلوله‌های چینی با چگالی بالا (و کارایی بیشتر) حدود  $3.3 - 3.5 \text{ g/cm}^3$  ارائه شده‌اند که دارای حدود 85٪ وزنی  $\text{Al}_2\text{O}_3$  به شکل سنگهای معدنی Borundum و Diamonite و Alcite هستند. این گلوله‌ها نسبت به گلوله‌های چینی معمولی گرانتر، سخت تر و در برابر سایش مقاومتر هستند. به طور کلی میزان تخریب روکش سرامیکی گلوله‌ها از 0.3٪ تا 0.5٪ در ۱۰۰ سال برای سنگ چخماق تا 2٪ تا 3٪ برای گلوله‌های چینی در هر ۱۰۰ سال متغیر بوده که در عمل مقدار فوق العاده ناچیزی است. [۲۵-۲۶]

### ۲-۳-۲- گلوله‌های فلزی

به علت چگالی بسیار بالتر فلزات نسبت به سایر مواد، گلوله‌های فلزی میزان آسیاب بیشتری (موثرتر) را در قطر کمتری از استوانه آسیاب انجام می‌دهند. هنگام استفاده از این گلوله‌ها به آسیاب‌های مقاومتر از

لحاظ ساختار و نیز به توان ورودی بالاتری نیاز است. گلوله‌های فولادی با میزان کربن و منگنز بالا و چگالی  $7.8 - 7.9 \text{ g/cm}^3$  از سایر گلوله‌های فلزی پر استفاده تر است.

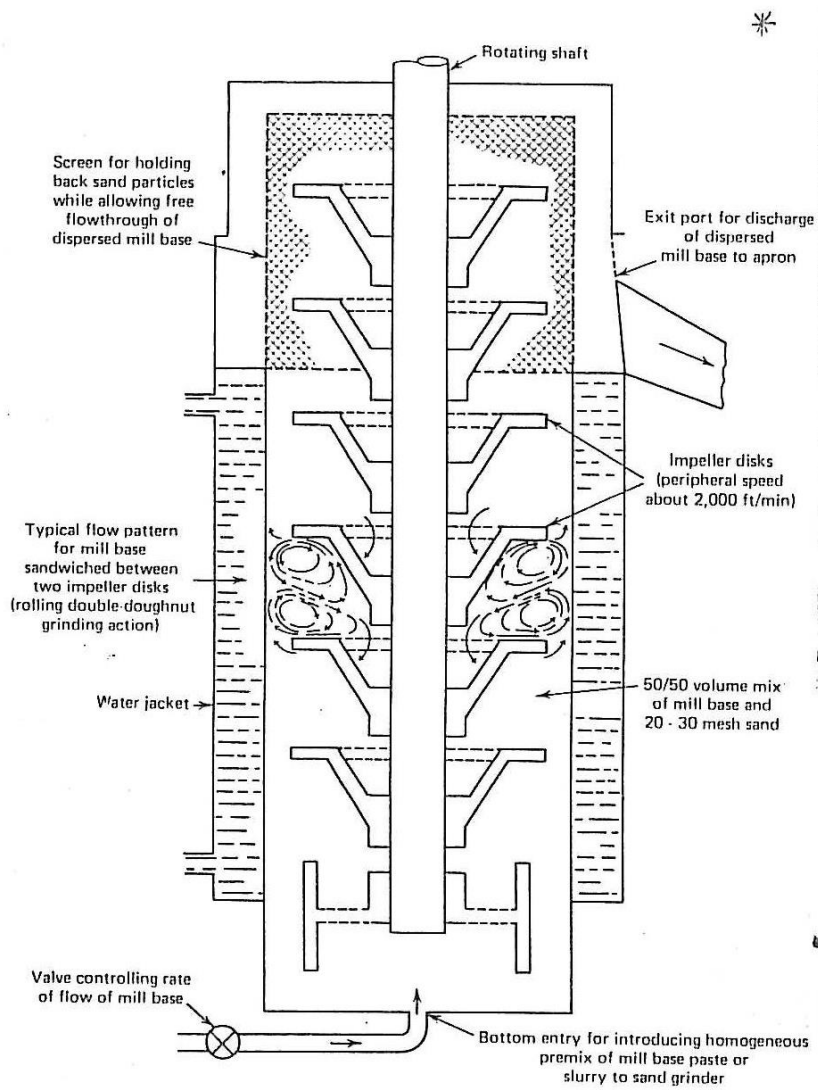
از فولاد ضد زنگ فقط در موارد خاصی همانند مقاومت در برابر اسید و عدم وجود خاصیت مغناطیسی در مخلوط آسیاب، استفاده می‌شود تا قیمت بالای آن قابل توجیه باشد. گلوله‌های ساخته شده از آلیاژهای گرانبه‌تر نیکل نیز در هنگامی استفاده می‌شوند که لازم است لکه گذاری فلز به حداقل ممکن خود برسد. اگر آلودگی محیط توسط فلزات قابل اغماض و پذیرش باشد، عموماً این گلوله‌ها از فولاد با درصد کربن کم که ارزانتر است تهیه می‌شوند. میزان تخریب روکش‌های فلزی از 0.1٪ تا 0.3٪ مدتی در هر ۱۰۰ سال برای فولاد کروم و منگن‌دار و از 0.3٪ تا 0.7٪ مدتی در هر ۱۰۰ سال برای فولاد کربنی (با درصد بالا) متغیر می‌باشد. [۲۷]

### ۳ - آسیاب‌های شنی، دانه‌ای و گویچه‌ای (Sand, Bead and Shot Mills)

آسیاب کردن و دسپرس کردن ذرات مواد رنگدانه‌ها توسط ذرات شنی مدور به عنوان یک تکنیک از سال 1952 شناخته شده است؛ اولین آسیابهای شنی از شن اتاوا با مش ۲۴ تا ۴۰ استفاده می‌کردند که بعدها این مش‌ها توسط ذرات سنتزی مختلفی جایگزین شدند. از جمله این ذرات دانه‌های شیشه‌ای، سرامیکی و گویچه‌های فلزی بودند. (metallic shot) این ذرات علیرغم گرانتز بودن، ویژگیهای فرآیندپذیری بهتری داشتند. شن اتاوا که فقط و فقط در آسیابهای شنی مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای مش ۲۰ تا ۳۰ با ابعادی حدود 0.7mm قطر معادل 1/32 inch می‌باشد. اندازه ذرات سنتزی مورد استفاده در این آسیاب‌ها نیز از 0.7-3 mm (معادل 1/32-1/8 inch) می‌باشد. [۲۸]

با توجه به نکات بالا، آسیاب شنی یا دانه‌ای آسیابی است که برای خرد کردن مخلوط آسیاب از ذراتی با اندازه‌های فوق بهره می‌برد و آسیاب گلوله‌ای از همین مکانیسم ولی با ذرات بزرگتر (بالای 1/8 inch) استفاده می‌کند. البته این تعریف تا حدودی ساختگی است چون اکثر آسیاب‌ها به نحوی ساخته شده‌اند که با

گستره وسیعی از ذرات با اندازه‌های مختلف کار کنند. پس عملاً بسیاری از آسیابها هم گلوله‌ای و هم شنی یا دانه‌ای هستند و فقط این ذراتی که به عنوان محمول خردایش در آنها ریخته می‌شود بستگی دارد.



شمای ۸: برشی عرضی از یک آسیاب شنی

### ۳-۱- توصیف آسیاب کردن با دانه‌های شنی

اساساً فرآیند آسیاب شنی عبارت است از پمپ کردن مخلوط همگنی از رنگدانه‌ها/ مواد زنگزا به همراه محمل آنها (در مورد رنگزاها می‌تواند آسیاب باشد) از درون یک مجرای استوانه‌ای از ذرات شن که تحت هم زدن و اغتشاش شدید قرار دارد. در حین حرکت مخلوط به سمت بالا از درون ناحیه شنی تحت اغتشاش، مخلوط در میان ذرات شنی محبوس شده و خرد می‌شود. سپس مخلوط خرد شده به همراه ذرات شنی از یک خروجی فیلتر دار عبور کرده که ذرات شن در اینجا از مخلوط جدا شده و مخلوط نهایی از آسیاب خارج می‌شود.

اغتشاش و به هم خوردن ذرات شنی به وسیله پره‌های دیسکی مسطح که با سرعت‌های بالا در حال چرخش هستند (2000 ft/min) انجام می‌شود. مخلوط آسیاب به همراه ذره‌های شنی در هنگام نزدیک شدن به پره‌ها به علت مقاومت گرانروشی، حرکت پره‌ها را به خود منتقل کرده و به دیوارهای پوشیده از ذرات شن کوبیده می‌شوند. این الگوی جریان به اصطلاح متداول Double – Doughnut نام دارد و باعث آسیاب شدن فوق العاده مخلوط می‌گردد.

در ناحیه نزدیک به پره‌ها می‌توان بزرگی نیروی موثر بر یک ذره شن را محاسبه کرد؛ اگر ذره شن در نزدیکی پره بچرخد نیروی گریز از مرکز وارد بر آن معادل همان نیرویی است که بر نوک پره (با سرعت  $V$ ) اعمال می‌شود. پس اگر جرم ذره معادل  $m$  و قطر پره معادل  $r$  باشد نیروی گریز از مرکز  $\frac{mv^2}{R}$  خواهد بود که می‌توان نسبت آن به نیروی وزن ذره را محاسبه کرد:

$$\frac{\text{centrifngal force}}{\text{Gravi tational force}} = \frac{mv^2}{R} = \frac{v^2}{rg}$$

با توجه به سرعت بسیار زیاد پره این نیرو چندین برابر نیروی وزن ذره شنی است. مثلاً اگر سرعت گردش پره همان 2000 ft/min و قطر آن 4 inch فرض شود نیروی وارد بر ذره در ناحیه میدان پره و

دیوارها 104 برابر وزن آن خواهد بود و همین نیروی عظیم باعث ایجاد برش بسیار زیاد و فرآیند کامل آسیاب می شود. (از اینجا می توان دریافت که چرا در این روش ذرات ریز با جرم کم استفاده می شود.)

### ۲-۳- انواع ذرات شنی

در اولین نوشته های مربوط به توصیف آسیاب شنی در سال 1952 (U.S. 2/581/414) به شن اتاوا با مش ۲۰ تا ۴۰ به عنوان محمول خردایش اشاره شده است. اندازه ذرات این شن ها حدود  $0.24 \pm 0.008$  inch می باشد. تا کنون جانشین طبیعی برای این ذرات یافت نشده و با توجه به قیمت، در دسترس بودن، یکنواختی، اندازه، چگالی، مقاومت سایشی و کارایی در آسیاب و خرداش همچنان از این ذره در عملیات خردایش در آسیابهای شنی استفاده می شود. البته دانه هایشتتزی کروی از جنس شیشه، سرامیک یا فولاد در بازار در دسترس هستند. [۲۹]

### ۳-۳- انتخاب دانه های آسیاب کننده

مهمترین عامل در انتخاب دانه های آسیاب کننده قیمت آنها و توجیه اقتصادی است؛ اما از لحاظ فن سه عامل در کنار قیمت به عنوان اساس انتخاب بررسی می شوند. این سه عامل اندازه، چگالی و ترکیب شیمیایی دانه ها هستند که برای هر سه آنها محدوده هایی توجیه پذیر به لحاظ اقتصادی وجود دارد.

#### ۳-۳-۱- اندازه دانه ها

تمامی آسیابهای گلوله ای و شنی در مجرای خروجی خود دارای فیلترهایی هستند که مخلوط آسیاب شده را (پس از آسیاب شدن) از دانه ها جدا می کنند. اندازه دانه ها با توجه به اندازه منافذ این فیلترها انتخاب می شود بهترین پیشنهاد آن است که اندازه متوسط قطر دانه ها حداقل 50٪ از قطر منافذ فیلتر بزرگتر باشد تا با مرور زمان باعث انسداد فیلتر و از کار افتادن آسیاب نشود. فرضا اگر آسیابی دارای یک فیلتر از



جنس نیکل (که بسیار متداول است) و اندازه منافذ آن 0.014 inch باشد، بهترین دانه ها برای آن آسیاب باید قطر متوسط معادل 0.021 inch داشته باشد. [۳۰]

دو عامل دیگر نیز در انتخاب اندازه ذرت موثر هستند: یکی اینکه دانه ها همه به یک اندازه نبوده و دارای توزیعی از اندازه ذرات در اطراف کوچکترین دانه ای هستند که اندازه اش به عنوان عدد قطر متوسط توسط سازنده اعلام می شود. از سوی دیگر به مرور زمان دانه ها در فرآیند آسیاب ساییده شده و قطر آنها کاهش می یابد پس حتما باید پس از مدتی تعویض شوند و یا از فیلتری با منافذ کوچکتر استفاده شود؛ البته زمان بسیار زیادی لازم است تا قطر دانه ها به قدری کاهش یابد که هنگام مواجهه با فیلترها مشکل ساز شوند مثلا اگر دانه ای به قطری معادل ۳ برابر قطر منافذ فیلتر موجود باشد باید حدود 90٪ از حجم آن در اثر سایش از بین برود تا به قطری معادل 1.5 برابر قطر منفذ برسد! اگر آسیاب در حین کار با دانه ها بارها و بارها با تواتر زیاد دچار اختلال عملکرد شود، نشانه آن است که ذرات برای خروج مخلوط آسیاب شده از منافذ مشکل ایجاد می کنند و اندازه ذرات دانه ها مناسب آسیاب مورد استفاده نیست.

ذرات کوچکتر دارای این مزیت هستند که سطح تماس بیشتری داشته و نقاط تماس بیشتری ایجاد می کنند. اگر دانه هایی با میزان اعلام شده  $N=0.639$  (packing factor) موجود باشند با فرض اینکه هر دانه دارای متوسط 4.6 نقطه تماس باشد، هنگامی که این دانه ها در حجم  $1 \text{ inch}^3$  به اصطلاح Pack می شوند، تعداد کل نقاط تماس از رابطه زیر به دست می آید:

$$\text{تعداد کل نقاط تماس} = \frac{5.6}{D^3}$$

که  $D$  نشانه قطر ذرات به  $\text{inch}$  می باشد. بر این اساس تعداد کل نقاط تماس برای ذرات به قطر  $1/8 \text{ inch}$  برابر 2900، برای ذرات به قطر  $1/16 \text{ inch}$  برابر 2300 و برای ذراتی به قطر  $1/32 \text{ inch}$  برابر با 180000 نقطه خواهد بود. پس به طور واضح استفاده از دانه های با قطر کمتر بسیار مناسب تر است چون نقاط تماس بیشتری با مخلوط آسیاب برقرار کرده و کارایی آسیاب را بالا می برد اما این انتخاب باید با توجه به

نکات از قبل گفته شده صورت گیرد یعنی ذرات آنقدر کوچک نباشند که ۱- انرژی پراکنش لازم را برای خرد کردن ذرات مخلوط را نداشته باشند و ۲- هنگام عبور مخلوط آسیاب از منافذ فیلتر مشکلی ایجاد نکنند. [۳۱]

### ۳-۳-۲- چگالی دانه ها

دانه هایی که چگالی پایینی دارند، مزیت سبکی مجموعه دانه ها و مخلوط آسیاب هنگام عبور از مجرای خردایش را به دست می دهند. این پدیده از آن جهت مهم است که مانع سایش دانه ها و خورده شدن جداره درونی آسیاب می شود. از سوی دیگر، دانه های با چگالی پایین تمایل کمتری به ته نشین شدن در انتهای مجرای آسیاب دارند. البته باید در نظر داشت که این ملاحظات در مورد آسیاب های دانه ای و شنی با طراحی عمودی اعتبار دارند زیرا مدل های جدید تری که دارای مجراهای آسیاب افقی هستند طبعاً چنین مشکلاتی را نخواهند داشت. [۳۲]

### ۳-۳-۳- ترکیب شیمیایی دانه ها

تمامی دانه ها، با ترکیبات شیمیایی متفاوت، در برابر خرد شدن به شدت مقاوم هستند بنابراین تنش ایجاد شده در جریان فرایند خردایش قادر به خرد کردن آنها نمی باشد. به بیان دیگر وجود هرگونه دانه خرد شده در مخلوط آسیاب به عنوان نوعی نقص و یا از کار افتادگی سیستم آسیاب ارزیابی می شود. سایش لبه های پره ها نیز ممکن است دانه ها را در شرایطی قرار دهد که موجب شکسته شدن آنها شود. در این حالت تعویض پره ها ضروری است.

شن و سایر دانه های سنتتیک (عمدتاً دانه های شیشه ای) که دارای پایین ترین چگالی در میان سایر دانه ها هستند، از آنجایی که قدرت سایش کمتری دارند باعث کمترین میزان خوردگی در جداره داخلی آسیاب نیز می شوند. دانه های با چگالی اندکی بالاتر از جمله شیشه های با مقاومت بالا ( $2/75 \text{ g/cm}^3$ ) و مولیت های سرامیکی ( $2/85 \text{ g/cm}^3$ ) به نسبت سایش بیشتری ایجاد می کنند با این تفاوت که سایش ایجاد

شده از دانه های شیشه ای باچشم غیر مسلح دیده نمی شود ولی سایش حاصل از مولیت های سرامیکی کاملاً پشت پوش است. از میان دانه های ساخته شده از اکسید آلومینا ( $3/6-3/8 \text{ g/cm}^3$ )، اکسید زیرکیم ( $5 \text{ g/cm}^3$ ) و شیشه های با چگالی بالا ( $3/8-4/5 \text{ g/cm}^3$ ) که بسیار ساینده هستند، فقط سایش ایجاد شده به وسیله دانه های شیشه ای با چشم غیر مسلح قابل دریافت نیست. در نهایت دانه های فلزی (فولاد یا آلیاژ کروم و آهن) قرار دارند که علیرغم اینکه چندان ساینده نیستند به علت دارا بودن چگالی بسیار زیاد باعث خورده شدن شدید جداره درونی آسیاب شده تا حدی که بخش خورده شده وارد مخلوط آسیاب می شود و رنگ آن را کمی به خاکستری تغییر می دهد. (gray-off)

به طور کلی دانه های شنی نسبت به دانه های شیشه ای در برابر سایش و تخریب مقاومترند. با این حساب هنگام انتخاب دانه ها، همانگونه که شرح آن گذشت، مهم ترین عوامل اندازه، چگالی و قیمت آنها هستند. [۳۱ و ۳۲]

- 1 – Schaffer, Martin H., Dispersion and Grinding, Unit 16, Federation Series on Coating Technology, Federation Societies for Paint Technology, Philadelphia, Pa., 1970.
- 2 – Askew, F. A., Printing Ink Manual, Society of British Printing Ink Manufacturers, W. Heffer and Sons Ltd., Cambridge, 1969.
- 3 – Leopold, C. H., Roller Mills, *Off. Dig.*, 27, No. 369, 682 (1955).
- 4 – Taylor, J. H. and A. C. Zettlemoyer, Production Rates in Three-Roll Mills, *Paint Manuf.*, 27, 299, August (1957).
- 5 – Zettlemoyer, A. C, and J. H. Taylor, Effect of Flow Properties in Production on Roll Mills, *Off. Dig.*, 32, No. 424, 648 (1960).
- 6 – Maus, L., W. C. Walker and A. C. Zettlemoyer, Dispersion Studies-Correlation of Roll Mill Variables, *Ind. Eng. Chem.*, 47, 696 (1955).
- 7 – Baker, C. E. and J. F. Vozzella, The Roll Mill, Pebble Mill and Kneader as Dispersion Equipment, *Off. Dig.*, 23, No. 319, 467 (1951).
- 8 – Hoback, W. H., Practical Aspects of Pigment Dispersion, *Off. Dig.*, 23, No. 316, 255 (1951).
- 9 – Shurts, R. B., More Production from Your Present Equipment, *Natl. Paint Varn. Lacquer Assoc. Sci. Sect. Circ. No. 753*, 1951.
- 10 – New York Production Club, Roll Grinding Study, *Natl. Paint Varn. Lacquer Assoc. Sci. Sect. Circ. No. 629*, 1941.
- 11 – Beakes, H. L., ‘Theory of Grinding’ in J. J. Mattiello (Ed.), *Protective and Decorative Coatings*, Vol. 4, Wiley, New York, 1944, pp. 80-94.
- 12 – New York Club, A Study of Pigment Dispersion: Part II, *Am. Paint J. Conv. Daily*, p. 12, November 5 (1948).
- 13 – Brown, H. M., Ball Mills, *Off. Dig.*, 20, No. 284, 668 (1948).
- 14 – Appell, F., Optimum Conditions of Operating Ball Mills, *Off. Dig.*, 22, No. 303, 315 (1950).
- 15 – Bulletin P-290, Jar, Ball and Pebble Milling-Theory and Practices, U. S. Stoneware Company, Akron, Ohio, 1962.
- 16 – Paul O. Abbe, Inc., *Optimum Conditions of Operating Ball Mills*, Little Falls, N. J.
- 17 – Monograph Series No. 101, ‘A General Consideration of Paint Paste Formulation’ and Monograph Series No. 102, ‘A General Review of Grinding Media and Mill Considerations’, Patterson Foundary and Machine Company, East Liverpool, Ohio, 1962.

- 18 – Gaynes, N. I., Ball Mills Are not Dead, *Am. Paint. J.*, Reprint, November 4 (1968).
- 19 – Garlick, O. H., Ball and Pebble Mills, *Paint Varn. Prod.*, 49, 53, March (1959).
- 20 – Baker, C. P. and P. Virtue, Factors Effecting Economic Optimum Paint Milling Time, *Off. Dig.*, 29, No. 385, 178. (1957).
- 21 – Redd, O. F., A Physical Basis for Mill Selection, *Off. Dig.*, 24, No. 324, 29 (1952).
- 22 – Mountsier, S. R., Review of Some Mixing and Grinding Equipment, *Off. Dig.*, 23, No. 315, 233 (1951).
- 23 – Baker, C. P. and J. F. Vozzella, Effect of Temperature on the Dispersion of Titanium Dioxide in Alkyd Resin/Mineral Spirits by Means of A Pebble Mill, *Off. Dig.*, 21, No. 294, 433 (1949).
- 24 – Jebens, R. H., Ball Mill Operation, *Paint Varn. Prod.*, 50, 53, March (1960).
- 25 – Paul O. Abbe, Inc., *Handbook of Ball Mill and Pebble Mill Operation*, rev. ed., Little Falls, N. J.
- 26 – Epworth Manufacturing Company, *Paint Machinery Handbook*, South Haven, Mich.
- 27 – Nylen, P. and E. Sunderland, *Modern Surface Coatings*, Wiley-Interscience, New York, 1965.
- 28 – Company brochure, ‘Selecting Sand Mill Medias’, Quackenbush Company, Palatine, Ill., 1977.
- 29 – Company brochure, ‘Supermill by Premier’, Premier Mill Corporation, 1140 Broadway, New York 10001.
- 30 – Maag, Theodor, ‘Dyno-Mill: An Advance in Dispersing Technology’, *Chem. Rundsch.*, 28, No. 10, (1975) (U. S. distributor: Impandex Inc., 260 West Broadway, New York 10013).
- 31 – Garret, M. D. et al., Dispersion of Carbon Black by Modified Sand Mill Technique, *Am. Ink Maker*, November 1969.
- 32 – Company brochure, ‘Bugs? In Your Bead Mill’, Quackenbush Company, Palatine, Ill. 60067, 1970.