دانشگاه شهید باهنر کرمان

گروه معدن

دانشکده فنی

جدایش فیزیکی

دکتر عباس سام

مهندس رضاناصح

تابستان ۱۳۹٤

فهرست مطالب

فصل اول ٥
مقدمه وتعاريف ٥
١- مقدمه ٦
٢- جداسازي از ديدگاه ترموديناميک ٦
٣- خواص فيزيکي ٧
٤- جداسازي فيزيکي کاني ها ٧
٥- محاسبات کانه آرايی ٨
٥-١- بازدهی جدايش (Separation Efficiency) ٩
٦- مسائل فصل: ١٣
فصل دوم ١٧
سنگ جوري ١٧
١- مقدمه ١٨
٢- مباني سنگجوري ١٨
٣- سنگ جوري دستي (Hand sorting) ١٨
٤- سنگ جوري اتوماتيک ٢٠
٤-١- بخش باردهي ٢٠
٤-١-١- باردهي تک رديفي ٢٠
٤-١-٢- باردهي تک لايه اي ٢١
٤-٢- بخش اندازه گيري و تحليل ٢٢
٤-٢-١- روش هاي نوري ٢٣
٤-٢-٢- راديواکتيويته و اشعه X ٢٩
٤-٢-٢-١- استفاده از اشعه X ٣١
٤-٢-٣- امواج راديويي ٣٣
٤-٢-٤- هدايت الکتريکي ٣٤
٤-٢-٥- هدايت حرارتي ٣٦
٤-٢-٦- روش هاي جديدتر ٣٦
٤-٣- بخش جداسازي ٣٦
٥- تميز کردن هوايي از طريق سايش (Air scrubbing) ٣٨
٦- ميزهاي چرب ٣٨

۶-۱- ميزهاي چرب لرزان ۳۹
۶-۲- ميزهاي چرب ارتعاشي ۳۹
۶-۳- نوارهاي چرب ٤١
۷- چسبندگي حرارتي..... ٤٢
فصل سوم ٤٤
جداسازي ثقلي ٤٤
۱- مقدمه ٤٥
۲- اصول حاكم بر جداسازي ثقلي..... ٤٥
۳- مكانيزم روش هاي پر عيارسازي ثقلي..... ٤٨
۳-۱- مكانيزم جدايش در دستگاه هاي گروه اول ٤٩
۳-۲- مكانيزم جدايش در دستگاه هاي گروه دوم ٤٩
۳-۳- مكانيزم جدايش در دستگاه هاي گروه سوم..... ٥٠
۴- جيگ ها ٥٠
۴-۱- اصول حركت ذرات در جيگ ٥١
۴-۲- پارامتر هاي موثر بر عمليات جيگ..... ٥٤
۴-۲-۱- سيكل جيگ..... ٥٤
۴-۲-۲- فركانس و دامنه نوسان در جيگ ٥٥
۴-۲-۳- ضخامت بستر جيگ..... ٥٥
۴-۲-۴- سرند جيگ ٥٥
۴-۲-۵- مكانيزم كنترل جيگ ٥٦
۴-۳- انواع جيگ ٥٧
۴-۳-۱- جيگ دستي(Hand Jig) ٥٧
۴-۳-۲- جيگ بوم(Baum Jig) ٦٠
۴-۳-۳- جيگ هارتس(Harz Jig)..... ٦١
۴-۳-۴- جيگ باتاگ(Batac Jig) ٦٢
۴-۳-۵- جيگ بندلاري (Bendelari Jig) ٦٣
۴-۳-۶- جيگ دنور (Denver Jig) ٦٤
۴-۳-۷- جيگ IHC (محوري)..... ٦٥
۴-۳-۸- جيگ هوايي..... ٦٧
۴-۳-٤- جيگ هاي گريز از مركز كلسي (Kelsey Jigs) ٦٨
۵- جداسازي بوسيله جريان لايه نازك آب ٧١
۵-۱- شستشوي ساده ٧٣

۵-۲- ناو شستشو(Pinched Sluice)..... ۷۶
۵-۳- جعبه شستشو (Sluice box) ۷۷
۵-۴- ميز لرزان آبي ۷۷
۵-۵- ميز لرزان هوايي (Pneumatic Table) ۸۱
۵-۶- جداکننده مخروطي (Reichert Cone) ۸۲
۵-۷- جدا کننده های مارپیچی (Spiral)..... ۸۵
۵-۸- دستگاه هاي جداساز نرمه و ذرات ريزدانه با استفاده از جريان لايه نازک آب..... ۸۹
۵-۸-۱- جداکننده MGS ۹۰
۵-۸-۲- جداکننده های فالکون (Falcon Concentrators) ۹۵
۵-۸-۳- جداکننده نلسون (Knelson)..... ۹۷
۵-۸-۴- جداکننده بارتلز موزلی یا میز نرمه (Bartles- Mozely Table) ۱۰۰
۵-۸-۵- جدا کننده نواری بی انتهای بارتلز (Bartles Crossbelt Concentrator)..... ۱۰۲
۵-۸-۶- استوانه جانسون ۱۰۳
۶- جداسازی با استفاده از واسطه سنگین..... ۱۰۵
۶-۱- مایعات سنگین ۱۰۷
۶-۲- نمک های محلول..... ۱۰۷
۶-۳- واسطه های سنگین ۱۰۸
۶-۴- جدا کننده های واسطه سنگین ۱۰۹
۶-۴-۱- جدا کننده مخروطی چانس ۱۱۰
۶-۴-۲- جدا کننده ي حلقوي (Norwalts) ۱۱۱
۶-۴-۳- جداکننده استوانه اي ومکو (Wemco Drum Separator) ۱۱۲
۶-۴-۴- جداکننده دريو بوي ۱۱٤
۶-۴-۵- سیکلون واسطه سنگین..... ۱۱٦
۶-۴-۶- سیکلون فقط آب..... ۱۱۷
۶-۴-۷- جداکننده Dyna whirlpool ۱۱۸
۶-۴-۸- جدا کننده تري فلو (Tri – flo)..... ۱۱۹
۶-۴-۹- جداکننده مخروطی ومکو ۱۲۱
۶-۴-۱۰- جداکننده Vorsyl..... ۱۲۱
۶-۴-۱۱- جدا کننده لارکادم (Larcodems Separator)..... ۱۲۳
۶-۴-۱۲- جدا کننده استوانه ای هاردینگ..... ۱۲۳
۶-۵- بررسی های آزمایشگاهی توسط مایعات سنگین و کاربردهای آن ۱۲٤
۶-۶- بازدهی جدایش توسط واسطه سنگین..... ۱۲۵

مسائل فصل ۱۲۷
فصل چهارم..... ۱۲۹
جداسازی الکتریکی ۱۲۹
۱- مقدمه ۱۳۰
۲- ساختمان جدا کننده های الکترواستاتیکی..... ۱۳۰
الف- مکانیزم باردار کردن – بی بار کردن ۱۳۰
ب- میدان الکتریکی خارجی..... ۱۳۰
ج- تنظیم کننده مسیر دانه های غیر الکتریکی ۱۳۱
د- سیستم های باردهی و جمع آوری محصول ۱۳۱
۳- مکانیزم های باردار کردن..... ۱۳۱
۳-۱- بار دار کردن توسط مالش و تماس..... ۱۳۲
۳-۲- باردار کردن با بمباران یونی یا الکترونی (تخلیه کرونا)– جدا کننده جریان فشار قوی ۱۳٤
۳-۳- باردار کردن با القا هدایتی – جدا کننده های اتصالی..... ۱۳٦
۴- جدا کننده های متفرقه..... ۱٤۱
فصل پنجم ۱٤۲
جدایش مغناطیسی..... ۱٤۲
۱-مقدمه ۱٤۳
۲- انواع جداکننده های مغناطیسي ۱٤٦
۳- جداکننده های مغناطیسی استوانه ای تر با شدت پایین ۱٤۷
الف) نوع با گرادیان بالا: ۱٤۹
ب) نوع با قطب کمکي: ۱۵۰
۳-۱- انواع جداکننده های مغناطیسی استوانه ای شدت پایین ۱۵۱
الف) نوع هم جهت: ۱۵۲
ب) جداکننده های غیر هم جهت با چرخش استوانه:..... ۱۵۲
ج) نوع غیرهم جهت با جریان پالپ:..... ۱۵٤
فصل پنجم ۱۵۵
منابع..... ۱۵۵

فصل اول

مقدمه وتعاریف

۱- مقدمه

اکثر کانی های پر کاربرد و مورد نیاز بشر در طبیعت به صورت ناخالص و همراه با کانی های دیگر یافت می شود. دلایل ناخالص بودن این کانی ها را می توان به نحوه شکل گیری اولیه آن ها و نیز تمایل ذاتی مواد به مخلوط شدن با یکدیگر نسبت داد. لذا اولین گام در استفاده از این کانی ها جداسازی و خالص سازی آن هاست. برای جداسازی مواد از یکدیگر بایستی از تفاوت خواص آن ها استفاده نمود. در جدایش فیزیکی از اختلاف در خواص فیزیکی کانی ها، جهت جداسازی آن ها استفاده می شود. این خواص می تواند رنگ، دانسیته خواص سطحی، خواص مغناطیسی، خواص الکتریکی و خواص حرارتی کانی ها باشد. در این درس با برخی تجهیزات و روش های جداسازی کانی ها که بر مبنای تفاوت در خواص فیزیکی می باشد آشنا خواهیم شد.

۲- جداسازی از دیدگاه ترمودینامیک

اکثر اوقات مخلوط شدن مواد با یکدیگر باعث افزایش بی نظمی سیستم و رسیدن سیستم به سطح انرژی پایین تر و پایدار تر می شود. تمایل به انجام خود به خودی واکنش ها را می توان با تغییر در انرژی آزاد گیبس توضیح داد. انرژی آزاد گیبس با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

در این رابطه:

ΔH: تغییر در آنتالپی سیستم

T: دمای مطلق سیستم

و ΔS: تغییر در آنتروپی سیستم است. در صورتی که $\Delta G < 0$ واکنش خود به خودی است و اگر $\Delta G > 0$ باشد واکنش غیر خود به خودی بوده و برای انجام آن نیاز به صرف انرژی داریم. در واکنش های تعادلی نیز که سرعت واکنش های رفت و برگشت یکی است، $\Delta G = 0$ خواهد بود. در فرآیندهای جداسازی اکثرا با کاهش

بی نظمی و افزایش سطح انرژی محصولات نسبت به مواد اولیه مواجهیم و بنابراین فرآیند جداسازی همواره مشکل بوده و نیاز به صرف انرژی دارد.

۳- خواص فیزیکی

خواص فیزیکی مواد به آن دسته از خواص ماده می گویند که نمایانگر شکل و ظاهر ماده بوده و به یک سیستم فیزیکی دلالت می کند. این خواص به دو دسته خواص شدتی و مقداری تقسیم می شوند. خواص شدتی خواصی از یک ماده هستند که به اندازه و مقدار آن وابسته نمی باشند، مانند دانسیته. خواص مقداری به خواصی گفته می شوند که بستگی به مقدار ماده دارند، مانند وزن و حجم. بدیهی است که تنها خواص شدتی ماده را می توان به عنوان مشخصه آن ماده در نظر گرفت. لذا در این درس، هر جا صحبت از خواص فیزیکی ماده به میان آمد منظور همان خواص شدتی است.

٤- جداسازی فیزیکی کانی ها

در جداسازی فیزیکی کانی ها، با استفاده از تفاوت در خواص فیزیکی آن ها اقدام به جداسازی و خالص سازی آن ها می کنیم. فلوتاسیون فرآیندی است که با استفاده از تفاوت در خواص سطحی کانی ها و تفاوت آن ها در جذب شدن بوسیله حباب های هوا در محلول به جداساری آن ها می پردازد. با توجه به گسترده بودن مباحث مربوط به فلوتاسیون، این مبحث به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و در این درس به آن نخواهیم پرداخت. جداکننده های ثقلی و واسطه سنگین با استفاده از تفاوت دانسیته کانی ها به جداسازی آن ها می پردازند. انواع جیگ ها، ناوهای شستشو میزهای لرزان، سیکلون های واسطه سنگین و ... از این دسته اند.

در فرآیند سنگ جوری (سورتینگ) از تفاوت در شکل و رنگ و خواص نوری، حرارتی، الکتریکی و یا رادیواکتیو، برای جداسازی کانی ها استفاده می شود. سنگ جوری که می تواند به صورت دستی و یا اتوماتیک صورت پذیرد گاهی برای پیش فرآوری و یا پرعیارسازی اولیه کانی ها مورد استفاده قرار می گیرد تا هزینه های فرآوری بعدی را کاهش دهد. امروزه در معادن بزرگ با حجم عملیاتی بالا، تکنیک های سنگ جوری خودکار مبتنی بر سنسور های الکتریکی و روش هایی همچون آنالیز تصویری، تقریبا به طور کامل جایگزین روش های دستی شده اند. تفاوت در خواص مغناطیسی کانی ها نیز مبنای جداسازی آن ها توسط جداکننده

های مغناطیسی است. جداکننده های مغناطیسی با شدت کم و یا زیاد، به روش خشک و یا تر بطور گسترده ای برای جداسازی کانی های فرو مگنتیک و یا پارامگنتیک به کار می روند. اختلاف در خواص الکتریکی کانی ها نیز مبنای جداسازی آن ها توسط جداکننده های الکتریکی است. تفاوت در میزان جذب الکتریسیته ساکن و نحوه باردار شدن آن ها به همراه استفاده از یک میدان الکتریکی قوی سبب جداسازی کانی ها می شود.

۵- محاسبات کانه آرایی

درعملیات آرایش کانه ای به وزن F، چنانچه فرض شود تولید یک محصول آراسته به وزن C و باطله ای به وزن T کرده باشد و عیار این سه بخش نسبت به عنصر آرایش به ترتیب f و c و t باشد، نسبت وزنی بار اولیه به محصول آراسته را ضریب آرایش گویند (Ratio of Concentration) :

$$K = \frac{F}{C}$$

نسبت عیار محصول آراسته به عیار بار اولیه نیز ضریب پر عیار سازی گویند (Enrichment Ratio):

$$E = \frac{c}{f}$$

بازیابی یا راندمان (Recovery)عملیات یعنی نسبت وزنی عنصر(یا کانی) با ارزش در محصول آراسته به مقدار آن در بار اولیه که برابر است با:

$$R = \frac{cC}{fF} \times 100$$

به طوری که ملاحظه می شود به دست آوردن ضریب آرایش نیاز به وزن بار اولیه و محصول آراسته دارد. برای به دست آوردن راندمان نیز علاوه بر پارامترهای فوق نیاز به عیار این دو بخش است. در عملیات پیوسته صنعتی، تعیین عیار هر بخش با نمونه برداری از آن در طول کار امکان پذیر است. لیکن تعیین وزن دقیق هر بخش به سادگی ممکن نیست. با توجه به معادله موازنه جرم:

$$F = C + T$$

در نتیجه وزن نسبی محصول پر عیار شده نسبت به بار اولیه برابر است با:

$$C_R = \frac{C}{F} = \frac{f-t}{c-t}$$

همان طور که ملاحظه می شود، تنها با داشتن عیار بخش های مختلف، می توان ضریب آرایش و راندمان را به دست آورد.

$$K = \frac{c-t}{f-t}$$

$$R = \frac{c(f-t)}{f(c-t)} \times 100$$

۵-۱- بازدهی جدایش (Separation Efficiency)

عیار محصول پر عیار شده و بازیابی آن پارامترهایی هستند که همراه یکدیگر برای ارزیابی فنی یک روش آرایش مورد استفاده قرار می گیرند. با وجود این ممکن است توسط این دو پارامتر نتوان به سادگی دو روش آرایش را با یکدیگر مقایسه کرد. چنانچه در یک روش عیار و بازیابی هر دو بیشتر باشد، مقایسه ساده است اما چنانچه در یک روش عیار و در روش دیگر بازیابی بیشتر باشد، انتخاب روش مناسب تر به سادگی میسر نیست. تلاش زیادی برای تبدیل این دو پارامتر به یک اندیس واحد شده است. شولز (Schulz) اندیسی به نام بازدهی جدایش (SE) تعریف کرده است که برابر است با:

$$SE = R_v - R_g$$

که در آن:

بازیابی کانی با ارزش(٪): R_v

بازیابی گانگ در محصول پر عیار شده(٪): R_g

می باشد. همانطور که قبلا نشان داده شده بازیابی کانی با ارزش برابر است با:

$$R_v = 100 \times \frac{cC}{fF}$$

اگر عیار در کانی با ارزش در حالت کاملا خالص m باشد، درصد کانی بـا ارزش در محصـول پـر عیـار شـده عبارت خواهد بود با :

$$\frac{c}{m} \times 100$$

و بنابراین درصد گانگ موجود در محصول پر عیار شده برابر است با:

$$100 \times \left(1 - \frac{c}{m}\right)$$

به روش مشابه درصد گانگ موجود در بار اولیه نیز برابر است با:

$$100 \times \left(1 - \frac{f}{m}\right)$$

بنابراین بازیابی گانگ در محصول پر عیار شده برابر است با:

$$R_g = \frac{\left(100 \times \left(1 - \frac{c}{m}\right)\right) \times C}{\left(100 \times \left(1 - \frac{f}{m}\right)\right) \times F} \times 100$$

ویا:

$$R_g = \frac{(m-c)C}{(m-f)F} \times 100$$

بنابراین:

$$S.E = \frac{cC}{fF} \times 100 - \frac{(m-c)C}{(m-f)F} \times 100$$

ویا:

$$S.E = \frac{Cm(c-f)}{Ff(m-f)} \times 100$$

و با توجه به این که:

$$\frac{C}{F} = \frac{f-t}{c-t}$$

بنابراین:

$$S.E = \frac{m(c-f)(f-t)}{f(m-f)(c-t)} \times 100$$

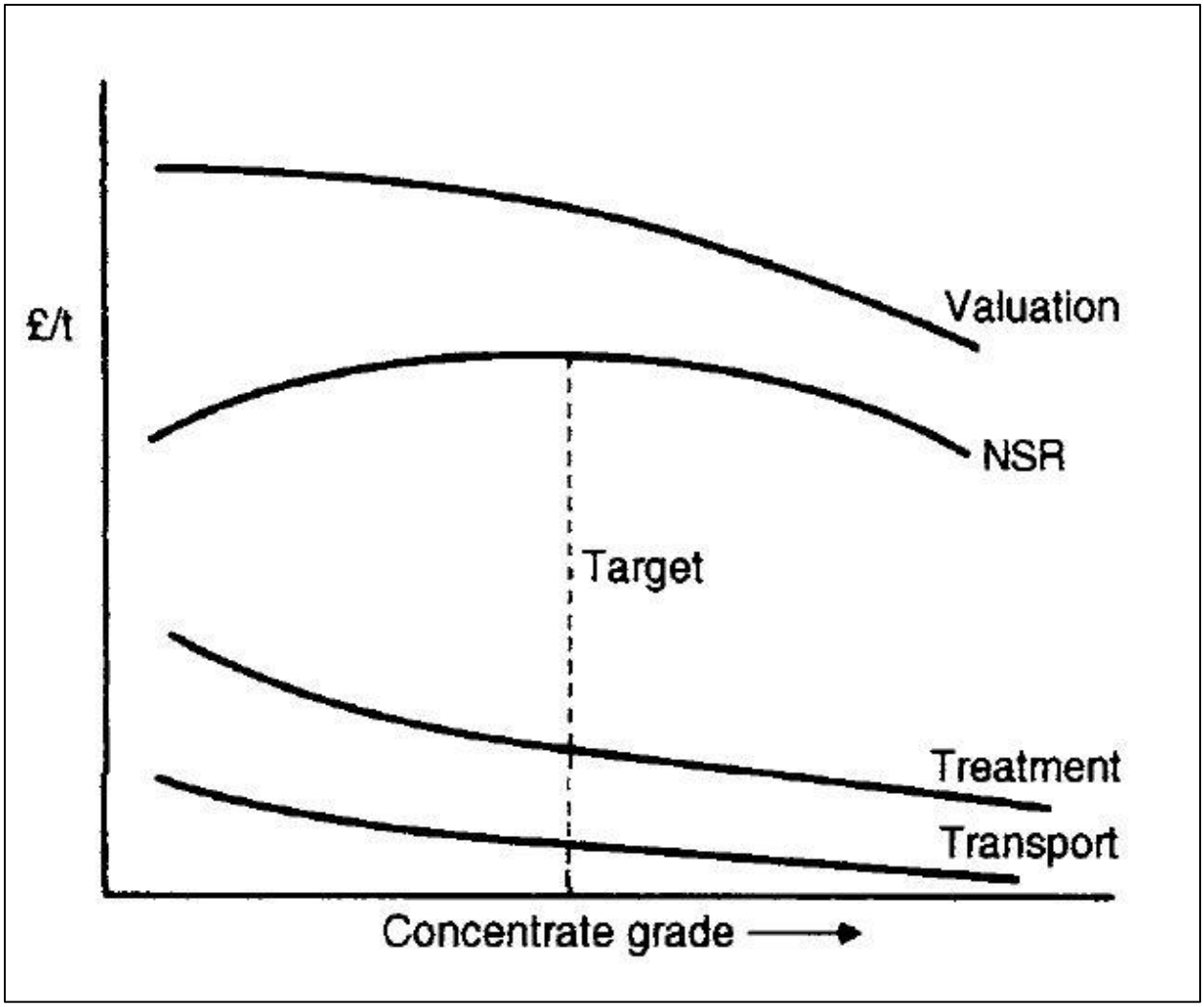
هرچند بازدهی جدایش (Separation Efficiency) برای مقایسه شرایط مختلف مفید است، ولی این پارامتر هیچ ارتباطی به پارامترهای اقتصادی ندارد و بازدهی جدایش زیاد، الزاما نشان دهنده بهترین شرایط از نقطه نظر اقتصادی نیست. با توجه به این که هدف از کانه آرایی، افزایش ارزش اقتصادی ماده معدنی است، لازم است ترکیبی از عیار و بازیابی انتخاب شود که به ازای هر تن ماده آرایش یافته، بیشترین ارزش افزوده را ایجاد کند. این امر دردرجه اول به قیمت رایج محصول با ارزش، هزینه حمل و نقل به واحد فرآوری بعدی (ذوب، پالایش،...) و هزینه این عملیات و در درجه بعد به عیار محصول پر عیار شده بستگی دارد. محصول پر عیار شده ای با عیار بیشتر، هزینه عملیات ذوب را کاهش می دهد، ولی افزایش عیار توام با کاهش بازیابی است که خود باعث کاهش ارزش افزوده می شود. به عکس افزایش بازیابی، مستلزم کاهش عیار است که با توجه به این که گانگ بیشتری همراه محصول است، باعث افزایش هزینه حمل و نقل و ذوب می شود.

پارامتر مهم دیگر، ناخالصی های موجود در محصول پر عیار شده است که ممکن است باعث شود جرائمی به آن تعلق گیرد و یا فلزات گران بها که باعث افزایش قیمت آن به صورت پاداش می شود.

درآمد خالص وابسته به ذوب را می توان برای هر ترکیبی از عیار – بازیابی به دست آورد:

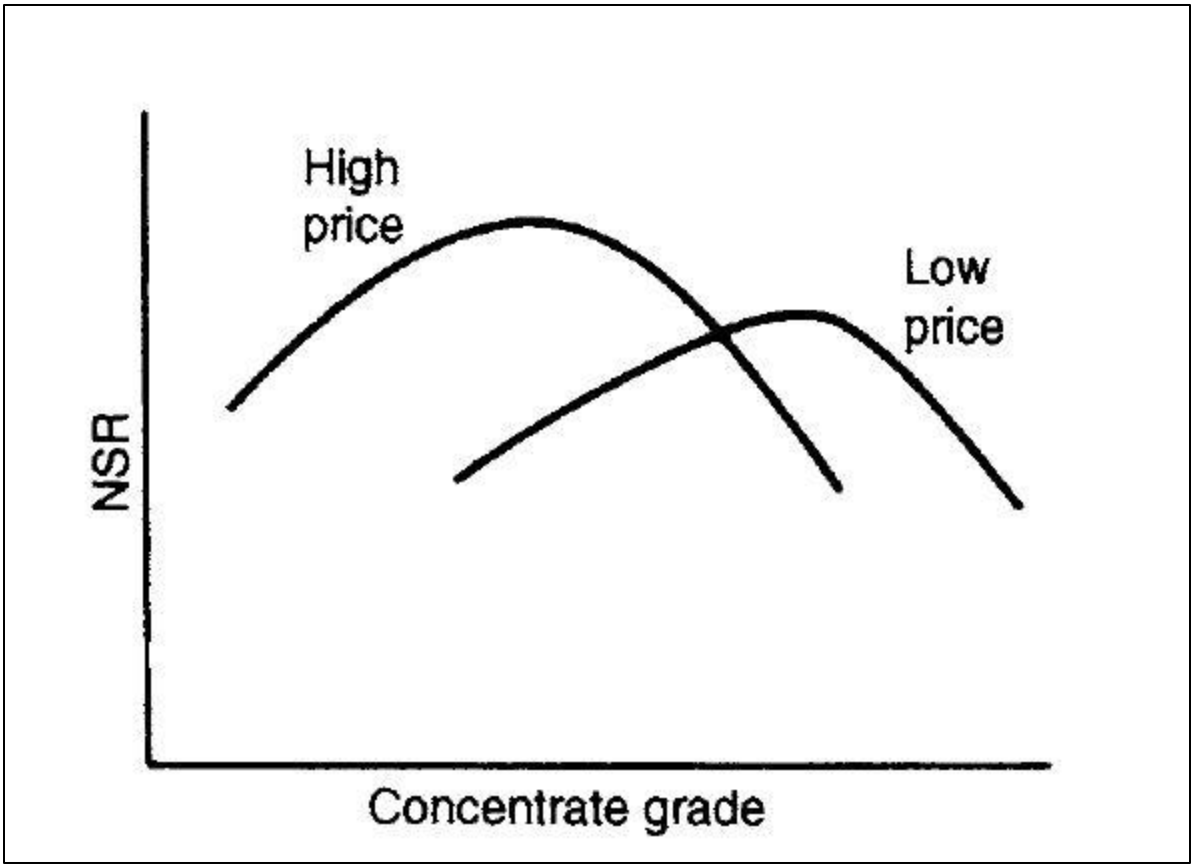
(هزینه حمل و نقل+ هزینه ذوب) – (قیمت فلز موجود در محصول) = درآمد خالص

شکل ۱-۱ تغییرات هزینه ها و درآمد نسبت به عیار محصول پر عیار شده نشان می دهد.



شکل ۱-۱- تغییرات هزینه ها و درآمد نسبت به عیار

همان طور که در شکل مشاهده می شود، ماکزیموم در آمد خالص در عیار اپتیمومی به دست می آید. بنـابراین می باید سعی کرد عیار محصول پر عیار شده تا حد ممکن به این عیار نزدیک باشد. بدیهی است کـه تغییـرات قیمت جهانی فلز، هزینه ذوب و غیره بر روی این منحنی تاثیر می گذارد و با تغییر شـرایط، عیـار اپتیمـوم نیـز تغییر خواهد کرد. برای مثال با افزایش قیمت فلز در بازارهای جهانی، عیار اپتیموم کاهش می یابـد و در نتیجـه می توان بازیابی کارخانه را افزایش داد. شکل ۱-۲ این موضوع را نشان می دهد.



شکل ۱-۲- تاثیر قیمت فلز محصول بر عیار اپتیموم

٦- مسائل فصل:

۱- عیار ماکزیموم کالکوپیریت و گالن را محاسبه نمایید.

جواب:

برای کالکوپیریت:

$$M(CuFeS_2) = 64 + 56 + 2 \times 32 = 184$$

$$m = \frac{64}{184} \times 100 = 34.78$$

برای گالن:

$$M(PbS_2) = 207 + 2 \times 32 = 241$$

$$m = \frac{207}{241} \times 100 = 85.89$$

۲- حداکثر عیار قابل دستیابی برای کانه ای که از سه کانی با ارزش کالکوسیت، کوولیت و کالکوپیریت به نسبت های ۶۰ و ۳۰ و ۱۰ تشکیل شده را محاسبه کنید.

برای کالکوسیت:

$$M(Cu_2S) = 2 \times 64 + 32 = 160$$

$$m_1 = \frac{2 \times 64}{160} \times 100 = 80$$

برای کوولیت:

$$M(CuS) = 64 + 32 = 96$$

$$m_2 = \frac{64}{96} \times 100 = 66.67$$

برای کالکوپیریت:

$$M(CuFeS_2) = 64 + 56 + 2 \times 32 = 184$$

$$m_3 = \frac{64}{184} \times 100 = 34.78$$

$$m = 0.6 \times 80 + 0.3 \times 66.67 + 0.1 \times 34.78 = 71.48$$

۳- عیار سنگ معدن ورودی کارخانه پرعیار کنی مس 1.2% می باشد. مس محتوی از دو کانی کالکوپیریت و کانی کالکوسیت تامین می شود. با بررسی های کانی شناسی مشخص گردیده است که نسبت وزنی کالکوپیریت به کالکوسیت ۳ به ۲ است. اگر عیار کنسانتره مس ۳۰٪ و بازیابی ۷۸٪ باشد، راندمان جدایش را محاسبه نمایید.

جواب:

$$m = 0.6 \times 34.78 + 0.4 \times 80 = 52.87$$

مبنا را ۱۰۰ تن خوراک در نظر می گیریم:

$$F = 100$$

$$R = \frac{cC}{fF} \times 100$$

در نتیجه:

$$C = \frac{fFR}{c \times 100} = \frac{1.2 \times 100 \times 87}{30 \times 100} = 3.48$$

$$S.E = \frac{Cm(c-f)}{Ff(m-f)} \times 100 = \frac{3.48 \times 52.87 \times (30-1.2)}{100 \times 1.2 \times (52.87-1.2)} \times 100 = 85.46$$

۴- کارخانه ای خوراکی با عیار مس ۱٪ را فرآوری می کند، سه ترکیب عیار و بازیابی قابل دستیابی است:

الف- ۲۷٪ مس با بازیابی ۹۱٪

ب- ۲۹٪ مس با بازیابی ۸۸٪

ج- ۳۱٪ مس با بازیابی ۸۰٪

اگر هزینه حمل، ۳۵۰۰۰ ریال بر تن، قیمت مس ۹۰۰۰ ریال بر کیلوگرم و هزینه عملیات ذوب، ۹۰۰۰۰ ریال بر هر تن باشد، کدام ترکیب از نظر بازدهی اقتصادی برتر است؟

جواب:

مبنا را یک تن خوراک در نظر می گیریم:

$$F = 1$$

$$R = \frac{cC}{fF} \times 100$$

در نتیجه:

$$C = \frac{R \times f}{c \times 100}$$

با جایگزاری موارد ۱ تا ۳ خواهیم داشت:

$$C_1 = 0.0337$$

$$C_2 = 0.0303$$

$$C_3 = 0.0258$$

برای C_1

هزینه حمل و نقل:

$$35000 \times 0.0337 = 1179.5$$

هزینه ذوب:

$$90000 \times 0.0337 = 3033$$

پرداختی کارخانه ذوب:

$$9000 \times 1000 \times 0.0337 \times 0.27 = 81891$$

$$NSR_1 = 81891 - 3033 - 1179.5 = 77678.5$$

به روش مشابه:

$$NSR_2 = 79083 - 1060.5 - 2727 = 75295.5$$

$$NSR_3 = 71982 - 903 - 2322 = 68757$$

در نتیجه ترکیب الف اقتصادی تر است.

فصل دوم

سنگ جوری

۱- مقدمه

سنگ جوری عبارت است از جداسازی کانی ها بر اساس رنگ، جلا، شکل و خـواص ظـاهری آن هـا. سـنگ جوری می تواند به صورت دستی و یا اتوماتیک صورت گیرد. اگرچه استفاده از این روش بسیار محدود اسـت اما گاهی اوقات می تواند به عنوان پر عیار سازی اولیه مورد استفاده قرار گرفته و هزینه های بعدی فـرآوری را به طور قابل ملاحظه ای کاهش دهد.

۲- مبانی سنگجوری

شرط انجام یک سنگ جوری موفق آن است که یکی از خصوصیات کانی مورد نظر تفاوت قابل توجهی با سایر کانی های همراه داشته باشد. سطح کانی ها باید به اندازه کـافی تمیـز باشـد. در عـین حـال روشـی کـه بـرای تشخیص کانی ها استفاده می شود بایستی علاوه بر سادگی و ارزانی به اندازه کافی قابل اطمینـان باشـد. سـنگ جوری وقتی به کار برده می شود کـه ذرات کـانی بـاارزش در انـدازه هـای بزرگتـر از 10mm آزاد شـود. در صورتی که دانه بندی بار اولیه بسیار گسترده باشد، گاهی لازم است ابتدا آن را به بخش هایی با دامنه محدود تر تقسیم نمود و هر بخش را به طور جداگانه سنگ جوری نمود. دستگاه های سـنگ جـوری بـا بررسـی جریـان مواد، تفاوت در خواص فیزیکی معینی را در بین آن ها اندازه گیری می کنند و با فرستادن علامت (سیگنال) بـه وسایل مکانیکی یا الکتریکی، ذرات با ارزش را از جریان جدا می کنند.

۳- سنگ جوری دستی (Hand sorting)

در روش سنگ جوری دستی کانی های با ارزش از روی رنگ، جلا و شـکل ظاهریشـان توسـط چشـم انسـان تشخیص داده شده و توسط دست جدا می شوند. در این صورت محصولی با عیار بالاتر حاصل خواهد شد که می توان آن را به مراحل بعدی فرآوری فرستاد. سنگ جوری دستی می تواند روی زمین، روی میزهای سـاکن، سطوح لرزان و یا سطوح متحرک همانند نوار نقاله صورت گیرد. رایج ترین روش استفاده از نوار نقاله با ارتفاع ۹۰ سانتی متر است. عرض نوار در صورتی که سنگ جوری از یک طرف آن انجام گیرد ۶۰ تا ۷۵ سانتی متر و در صورتی که در دو طرف آن انجام گیرد ۹۰ تا ۱۲۰ سانتی متر است. فاصله کارگران با یکدیگر ۱ تـا ۲ متـر و در کنار هر یک قیفی برای خروج قطعات جدا شده قرار دارد. سرعت نوار بستگی به ابعاد قطعات ماده معـدنی

بین 0.05 تا 0.4 متر بر ثانیه و به طور متوسط 0.2 متر بر ثانیه است. این روش برای آرایش مواد در ابعاد ۵ تا ۳۰ سانتی متر مناسب است. از آن جا که وسیله تشخیص کانی ها چشم انسان است، محیط کـار بایسـتی دارای روشنایی کافی باشد. نور محیط بایستی به گونه ای انتخاب شود که اختلاف رنگ ظاهری قطعـات در بیشـترین مقدار خود قرار گیرد. برخی کانی ها در طول موج هـای خاصـی از نـور مرئـی دارای خاصـیت فلورسـانس و فسفرسانس می باشند. لذا از چنین طول موج هایی می توان برای تشخیص دانه ها اسـتفاده کـرد. روش سـنگ جوری دستی معمولا برای سنگ ها و جواهرات قیمتی و یا برای مواردی که حجم کار چندان بالا نیست به کار می رود و در بقیه موارد از سنگ جوری اتوماتیک استفاده می گردد.

شکل۲-۱- نمایی از سنگ جوری دستی روی زمین

شکل ۲-۲- نمایی از سنگ جوری دستی روی نوار نقاله

٤- سنگ جوری اتوماتیک

با توجه به محدودیت روش سنگ جوری دستی از نظر ظرفیت و ابعاد دانه ها، از اواسط دهه ۱۹۶۰ سنگ جوری اتوماتیک گسترش یافت. با استفاده از این روش می توان مواد معدنی را با ابعاد 1.5 تا 200 میلی متر با ظرفیتی تا حدود ۱۵۰ تن بر ساعت آرایش داد. اصول سنگ جوری اتوماتیک شامل بخشی برای انتقال دانه ها به طور جداگانه، بخشی برای اندازه گیری برخی خواص دانه ها (بجای چشم انسان)، بخشی برای تشخیص دانه ها از یکدیگر (بجای مغز انسان) و سرانجام بخشی برای جداکردن دانه های مورد نظر (بجای دست انسان) می باشد. بنابراین یکی از مشخصات دانه های در حال عبور در محلی خاص اندازه گیری شده و نتیجه تبدیل به یک سیگنال الکتریکی می شود. این سیگنال در یک کامپیوتر مورد ارزیابی قرار گرفته و در صورت تطابق فرمانی به بخش جداکننده ارسال می شود تا دانه مورد نظر را از مسیر خارج نماید.

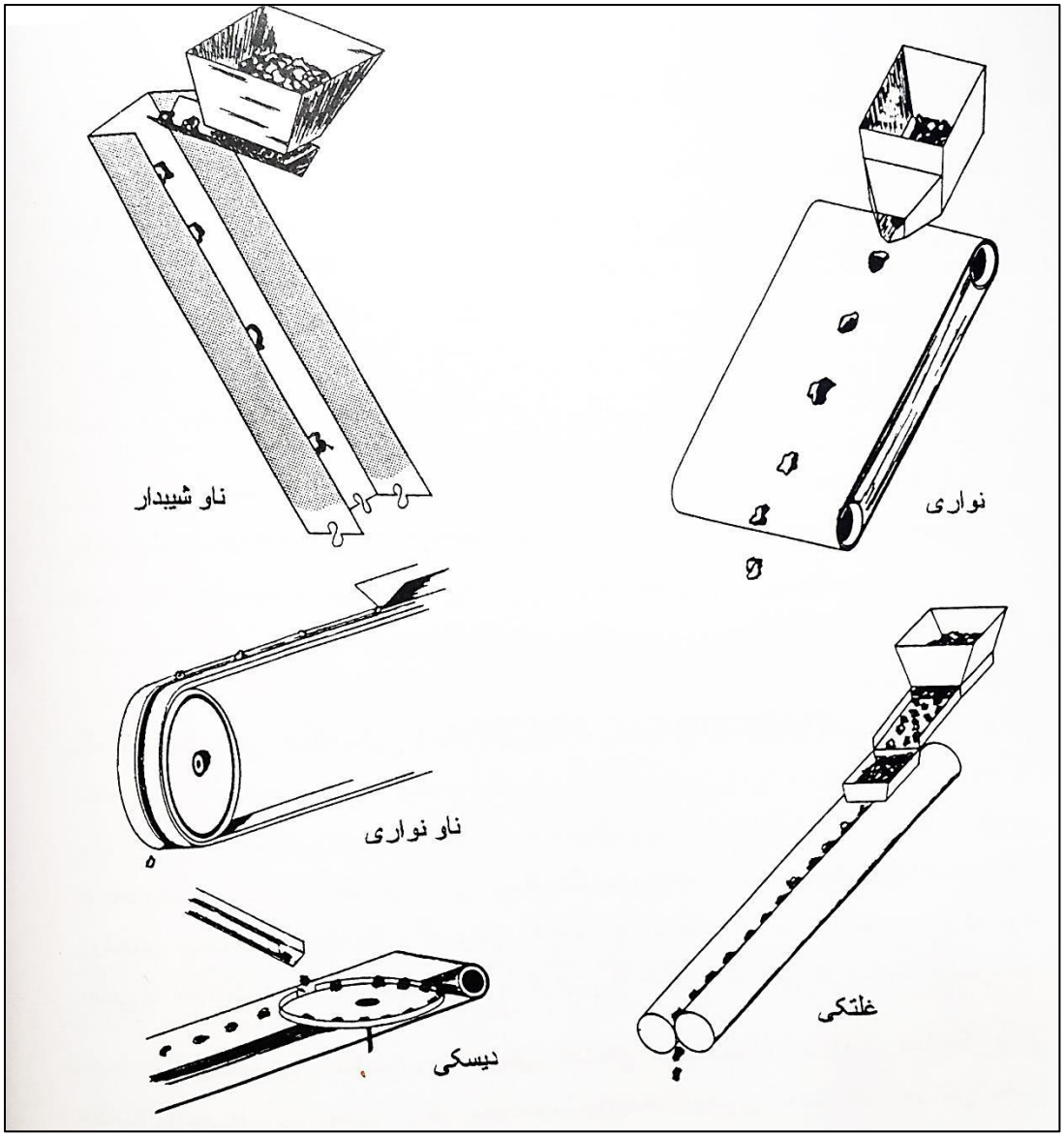
لازم به ذکر است که گسترش سنگ جوری اتوماتیک مدیون ابداع سنسورها و وسایل مدرن الکترونیکی است که قادر به انجام پاره ای از وظایف مغز انسان هستند و لذا گاهی به این روش ها سنگ جوری الکترونیکی گفته می شود. سنگ جوری اتوماتیک شامل سه بخش عمده است: بخش باردهی، بخش اندازه گیری و تحلیل و بخش جداسازی.

٤-١- بخش باردهی

وظیفه بخش باردهی انتقال دانه های تشکیل دهنده ماده معدنی به طور جداگانه به بخش اندازه گیری است. باردهی به دو صورت باردهی تک ردیفی و بار دهی تک لایه ای صورت می گیرد.

٤-١-١- باردهی تک ردیفی

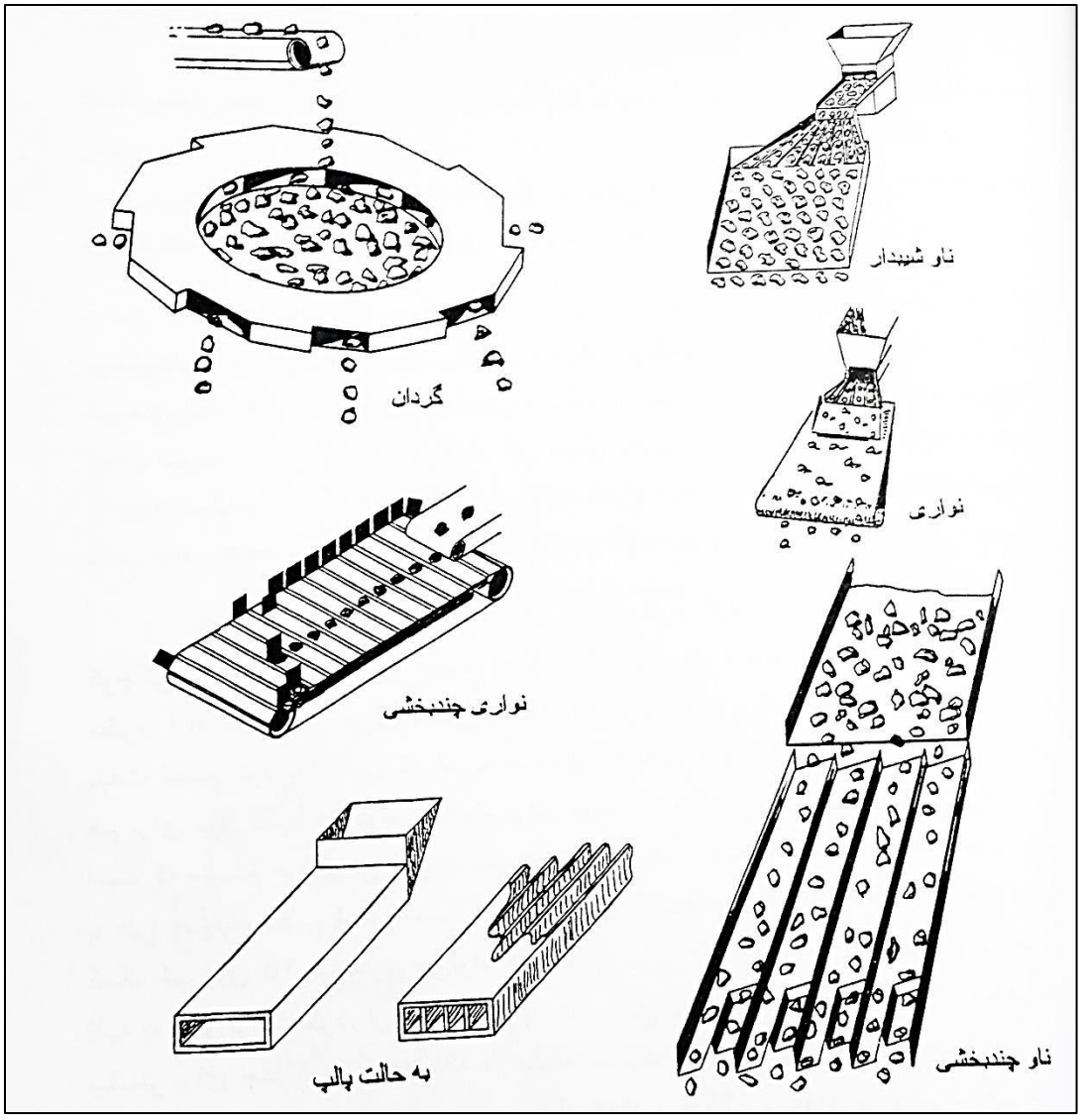
یکی از روش های باردهی، باردهی تک ردیفی است که در آن قطعات سنگ به طور جداگانه و در یک ردیف حرکت می کنند. مزیت این روش امکان بررسی دانه ها از همه جوانب آن است. شکل۲-۳ انواع مختلف این سیستم را نشان می دهد.



شکل۲-۳- انواع مختلف سیستم باردهی تک ردیفی

٤-۱-۲- باردهی تک لایه ای

روش دیگر باردهی، سیستم تک لایه ای است. در این روش لایه ای از مواد با عرض مناسب و به ضخامت یک دانه در حال حرکت می باشد. ظرفیت این روش بسیار بیشتر از روش تک ردیفی است اما در این روش امکـان بررسی دقیق دانه ها از جوانب مختلف وجود ندارد. شکل ۲-۴ انواع مختلف این روش را نشان می دهد.



شکل ۲-۴- انواع مختلف سیستم باردهی تک لا یه ای

٤-۲- بخش اندازه گیری و تحلیل

در این بخش مشخصه ای از دانه که مبنای سنگ جوری است مورد انـدازه گیـری قـرار گرفتـه و توسـط یـک سیستم کامپیوتری مورد تحلیل قرار می گیرد. برخی از خواص دانه ها که می توانند مبنای سـنگ جـوری قـرار بگیرند عبارتند از:

خواص نوری

رادیواکتیویته طبیعی یا القائی

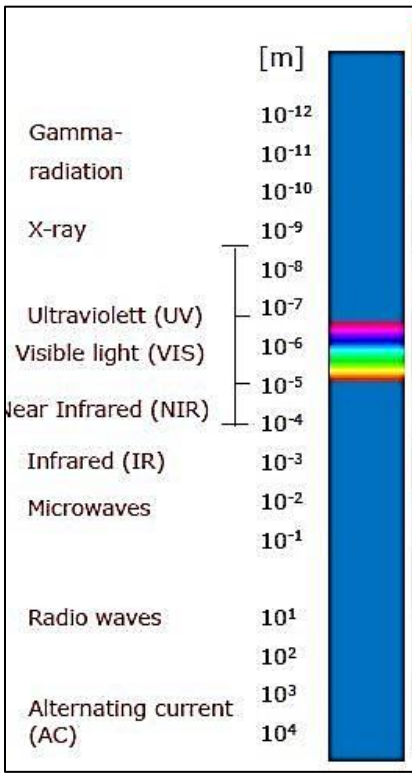
هدایت الکتریکی

با توجه به پیچیدگی خواص مواد معدنی، در اکثر موارد لازم است بیش از یکی از خواص آن ها انـدازه گیـری شود. روش های مختلفی برای اندازه گیری خواص دانه ها و استفاده از آن جهت سنگ جوری وجـود دارد کـه به برخی از این روش ها اشاره می کنیم.

٤-٢-١- روش های نوری

بخش عمده ای از روش های اندازه گیری بر مبنای خواص دانه های معدنی در طول موج های خاص از طیف الکترو مغناطیسی پایه گذاری شده است. طول موج های مختلف طیف الکتـرو مغنـاطیس و روش هـای سـنگ جوری مربوط به هر دامنه از طول موج در جدول ۲-۱ آورده شده است.

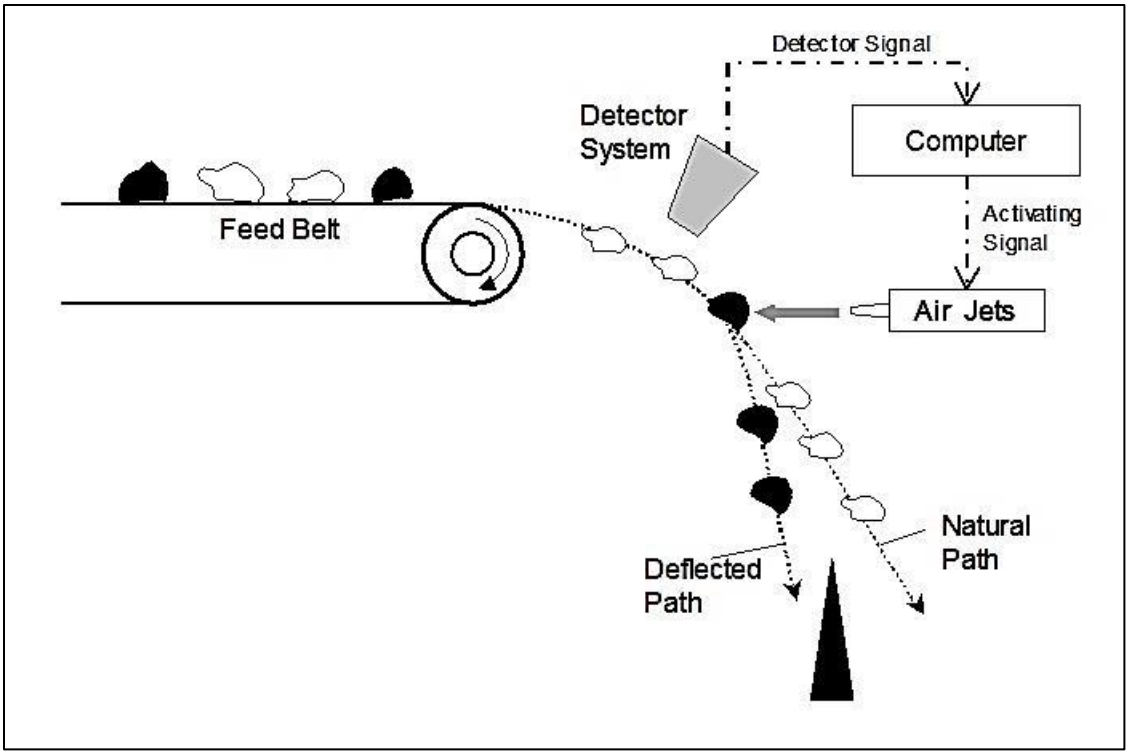
جدول ۲-۱- طول موج ها مختلف طیف الکترو مغناطیس و موارد استفاده آن ها در سنگ جوری



Sensor/ Technology	Material Property	Mineral Application
RM (Radiometric)	Natural Gamma Radiation	Uranium, Precious Metals
XRT (X-ray transmission)	Atomic Density	Base/Precious Metals Coal, Diamonds
XRL (X-ray luminescence)	Visible Fluorescence under X-rays	Diamonds
ED-XRF (Energy Dispersive XRF)	X-ray Fluorescence	Fe grade thresholds
COL (CCD Color Camera)	Reflection, Brightness, Transparency	Base/Precious Metals Ind. Minerals, Diamonds
PM (Photometric)	Monochromatic Reflection/Absorption	Ind. Minerals, Diamonds
NIR (Near Infrared Spectrometry)	Reflection, Absorption	Base metals Industrial Minerals
IR (Infrared cam)	Heat conductivity, heat dissipation	Base Metals Industrial Minerals
MW-IR (heating in conjunction with IR)	Sulfides & Metals heat faster than other minerals	Base/Precious Metals
EM (Electro-Magnetic sensor)	Conductivity	Base Metals, Magnetite

بیشتر روش های نوری بر مبنای انکسار یک اشعه نورانی (در مورد کانی های شفاف) و یا انعکاس (در مورد کانی های کدر) و اندازه گیری نور منعکس شده و یا منکسر شده توسط یک فتوسل استوار است. سنگ جوری توسط نور سنجی(photometric sorting)، روش مکانیزه سنگ جوری دستی است. کاربرد اصلی سنگ جوری توسط نورسنجی در جدایش کانی های باریت، تالک، آهک، مرمر و ولفرامیت است. عوامل موثر در انعکاس نور، رنگ، جلا و سطوح کلیواژه کانی ها هستند. اشعه نورانی مورد استفاده در محدوده های خاصی از نور مرئی قرار دارد. نورهای منعکس شده از دانه های مختلف ممکن است از نظر درخشندگی یا شدت نور (بدون توجه به رنگ) با یکدیگر تفاوت داشته باشند. فتوسل تنها به شدت نور حساس است و در آن تفاوتی بین نور عبور کرده و یا منعکس شده و جلا و رنگ وجود ندارد. برای جلوگیری از پدیده های انعکاس کامل، معمولا توسط فتوسل روش های پراکنده را نیز اندازه گیری می کنند. در مورد کانی های شفاف نیز برای کنترل نور می توان از نور پلاریزه نیز استفاده کرد. ساده ترین روش برای تشخیص کانی های شفاف به کمک نور منکسر شده استفاده از اصولی است که برای باز و بسته شدن درهای خودکار (مثل آسانسور) به کار گرفته می شود. به این منظور یک اشعه نورانی از یک منبع به یک فتوسل برخورد می کند. با عبور دانه های معدنی از مقابل فتوسل، دانه های کدر مانع رسیدن نور به فتوسل می شوند در حالی که دانه های شفاف اجازه عبور نور را می دهند. هر یک از این دو حالت منجر به تولید علائم الکتریکی می شود که از طریق سیستم تحلیل گر مرکز کنترل باعث هدایت هر یک از کانی ها به بخش پیش بینی شده می گردد. در این وسیله به جای نور طبیعی می توان از نور پلاریزه استفاده کرد. عبور نور پلاریزه از کانی شفاف ممکن است باعث از بین رفتن و یا دی پلاریزاسیون آن شود و به این ترتیب امکان جداسازی کانی های شفاف از یکدیگر نیز وجود دارد.

شکل ۲-۵ نمایی از یک سیستم سنگ جوری نوری را نشان می دهد. شکل ۲-۶ مخلوطی از سنگ های سفید کربنیت با سنگ های تیره مگنتیت و دولریت را نشان می دهد و شکل ۲-۷ همان نمونه است، بعد از سنگ جوری نوری.



شکل ۲-۵- نمایی از یک سیستم سنگ جوری نوری

شکل ۲-۶- مخلوطی از سنگ های سفید کربنیت و تیره تر مگنتیت و دولریت

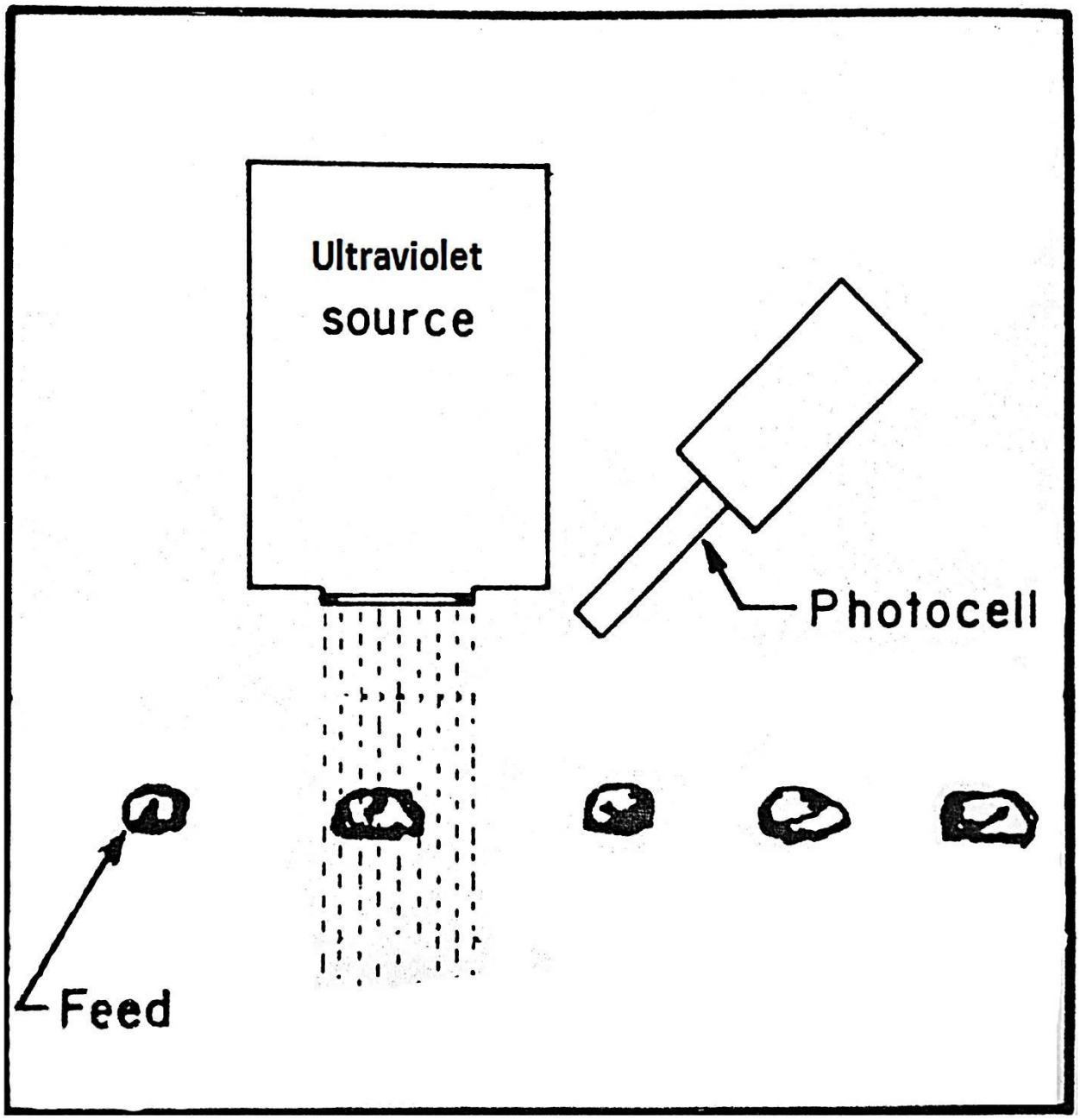
شکل ۲-۷- محصول سنگ جوری نوری از شکل قبل

از نور مادون قرمز نیز برای تشخیص و جداسازی کانی ها استفاده شده است. به طور کلی همه امواج با طول موج بیشتر از نور مرئی، نور مادون قرمز هستند. در عمل طول موج های مورد استفاده بین ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ نانو متر هستند. تجهیزات اندازه گیری در این سیستم وسائلی هستند که حساسیت زیادی نسبت به تغییرات جزئی دما دارند. میزان حرارت جذب شده در کانی های مختلف به نوع آن ها بستگی دارد. در صورت استفاده از طول موج های محدود، اختلاف حرارت جذب شده، قابل توجه است. عکس برداری هوایی مادون قرمز نیز مبنای روش مناسبی برای تشخیص و سنگ جوری کانی هاست. با وجود این کاربرد این روش بسیار محدود است. یکی از موارد آن تشخیص الیاف آمیانت در سنگ معدنی است. آمیانت نسبت به کانی های همراه دارای هدایت حرارتی کمتر و سطح خارجی بیشتر است. لذا با قرار گرفتن در مقابل یک شعله، الیاف آمیانت سریع تر از سایر کانی ها گرم می شوند. توسط یک وسیله اندازه گیری نور مادون قرمز منتشر شده می توان الیاف آمیانت را شناسایی کرد.

پدیده لومینسانس(luminescence) در اثر انتشار خود به خود فتون ها از بعضی مواد به وجود می آید. بدین منظور لازم است. ابتدا آن ماده به نحوی (مثلا با قرار گرفتن در معرض تشعشع) انرژی کسب کند. ماده ای که بدین ترتیب تحریک شود، می تواند بلافاصله عمل عکس را انجام دهد و انرژی اکتسابی را به صورت نورافشانی از خود ساطع کند. سرعت این عمل قابل اندازه گیری است. چنانچه این عمل در زمان کوتاهی (کمتر از یک دهم ثانیه) صورت گیرد، به آن فلوئورسانس(fluorescence) و در صورتی که در مدت زمان بیشتری به وقوع پیوندد، به آن فسفرسانس(phosphorescence) گویند. در مورد اکثر مواد تشعشع ساطع شده طول موج اپتیمومی دارد. هر چند پدیده لومینسانس در مورد مواد زیادی مشاهده شده است، لیکن کانی هایی که دارای این خاصیت می باشند محدود هستند. پدیده فلوئورسانس معمولا در بلورهای حاوی برخی ناخالصی ها مشاهده می شود. لذا این پدیده ممکن است در یک کانی مشخص مربوط به یک کانسار مشاهده شود و در همان کانی از کانسار دیگر مشاهده نشود. تنها موارد استثناء شیلیت و بعضی از کانی های اورانیوم هستند. سنگ جوری مواد معدنی با استفاده از خاصیت فلوئورسانس، توسط نور مرئی دارای مشکلات عملی بسیار زیادی است. با استفاده از نو مادون قرمز نیز تشعشعاتی با طول موج بزرگتر منتشر می شود که اندازه گیری آن ها بسیار مشکل است. لذا از نور ماوراء بنفش استفاده می شود. برای جداسازی شیلیت، از خاصییت فلوئورسانس آن، وقتی که در معرض اشعه ماوراء بنفش قرار می گیرد استفاده می شود. جدول ۲-۲ عمده ترین کانی هایی که با تحریک توسط نور ماوراء بنفش دارای خاصیت فلوئورسانس می شوند، نشان داده شده اند. شکل ۲-۸ نیز اصول کار این نوع جداکننده را نشان می دهد.

جدول ۲-۲- کانی های دارای خاصیت فلوئورسانس

Mineral	Composition	Ultraviolet range		Probable color of fluorescence
		Near 4–300 mμ	Far 3–200 mμ	
Scheelite	$CaWO_4$		x	Light blue
Fluorite	CaF_2	x		Violet to green
Spodumene				
Kunzite	$LiAl(SiO_3)_2$	x		Reddish yellow
Hiddenite	$LiAl(SiO_3)_2$	x		Purple
Calcite	$CaCO_3$	x		Red
Willemite	Zn_2SiO_4		x	Green
Quartz				
Calcedony	SiO_2	x		Yellow-green
Opal	SiO_2	x		Yellow-green
Agate	SiO_2	x		Yellow-green
Spinell	$MgAl_2O_4Cr$	x		Red
Kyanite				
Disthene	Al_2SiO_5Cr	x		Red
Corundum				
Saphire	Al_2O_3Ti	x		Orange-red
Ruby	Al_2O_3Cr	x		Red
Beryl	$Be_3Al_2(SiO_3)_6Cr$	x		Red
Autunite	$Ca(UO_2)_2P_2O_8 \cdot 8HO_2$	x		Greenish-yellow
Torbernite	$Cu(UO_2)_2P_2O_8 \cdot 12H_2O$	x		Greenish-yellow

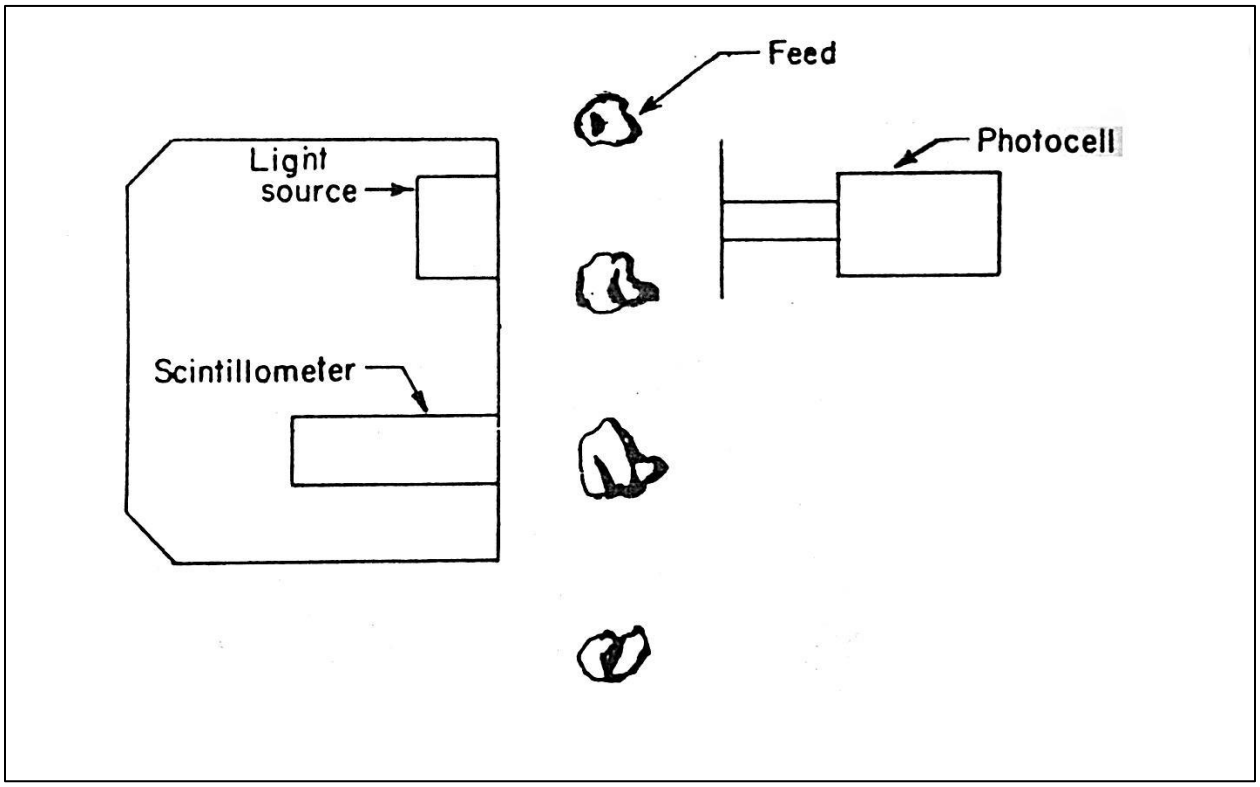


شکل ۲-۸- اصول کار دستگاه سنگ جوری کانی های فلوئورسانس

٤-۲-۲- رادیواکتیویته و اشعه X

بعضی از مواد مانند اورانیوم و توریوم، خود به خود تجزیه می شوند و دارای رادیواکتیویته طبیعی هستند. با توجه به این که این قبیل مواد دارای خاصیتی یکنواخت و مشخص هستند که به سهولت قابل اندازه گیری می باشند، وسائلی که بر مبنای خاصیت فوق مواد را جدا می کنند گسترش زیادی یافته اند. موادی که دارای

خاصیت رادیو اکتیویته طبیعی هستند، تولید اشعه های α، β و γ می کنند. در نخستین وسایل اندازه گیری برای کانه های پر عیار از کنتور گایگر حساس به اشعه γ و برای کانه های کم عیار از کنتور گایگر حساس به اشعه β استفاده شده است. دستگاه هایی که توسط کنتور گایگر مواد رادیواکتیو را تشخیص می دهند، دارای ظرفیت زیادی نیستند. برای افزایش ظرفیت در حد قابل قبول، از سنتیلومتر (Scintillation counter) استفاده شده است. این وسیله در کسری از ثانیه قادر به تشخیص دانه های حاوی مواد رادیواکتیو است. با توجه به این که در این روش میزان مواد رادیواکتیو عبور کرده از مقابل سنتیلومتر، بدون در نظر گرفتن حجم یا وزن سنگ معدنی حاوی این مواد، اندازه گیری می شود، لذا نتایج حاصل از یک قطعه سنگ بزرگ با عیار کم و یک قطعه سنگ کوچک با عیار زیاد ممکن است مساوی باشد. بنابراین لازم است عیار حدی برای دانه های عبور کرده تعیین کرد و ابعاد تقریبی هر قطعه سنگ را نیز توسط فتومتر اندازه گیری نمود. اصول کار این روش در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.



شکل ۲-۹- اصول کار دستگاه سنگ جوری کانی های رادیواکتیو طبیعی

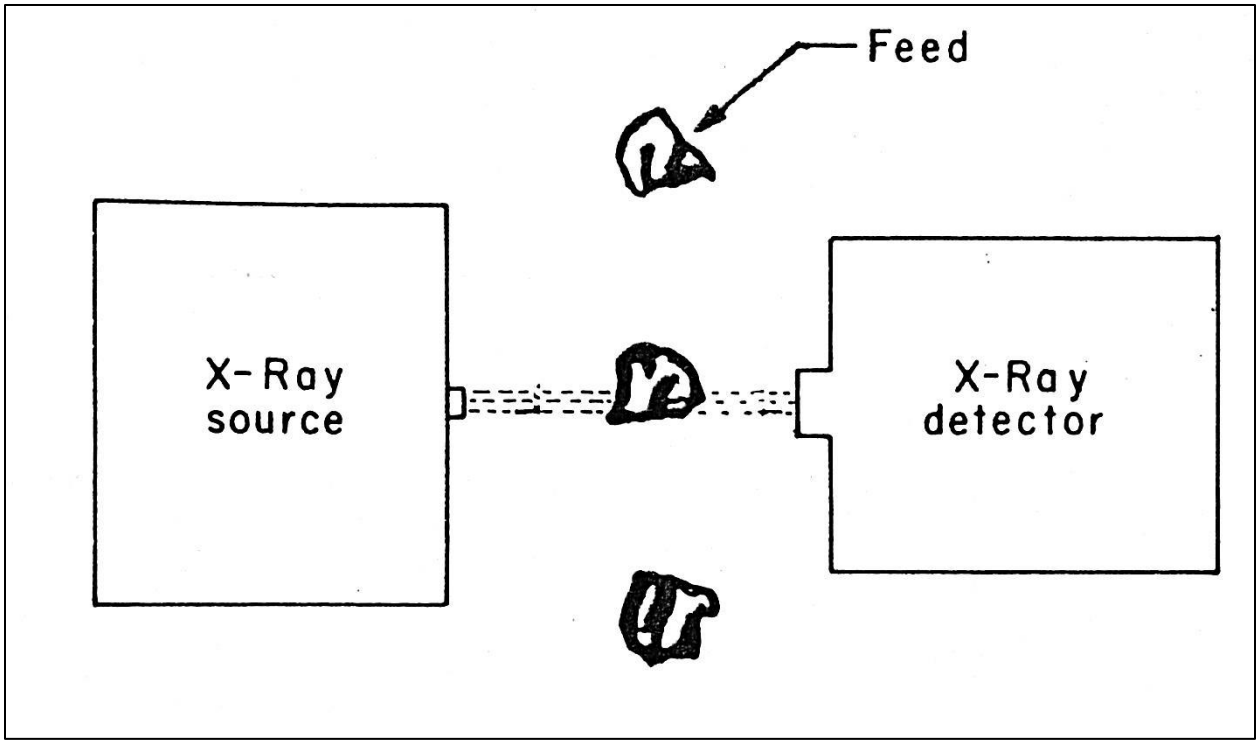
بسیاری از عناصر در اثر بمباردمان نوترنی دارای خاصیت رادیواکتیویته می شوند. ایزوتوپ هـایی کـه بـه ایـن طریق به دست می آیند ناپایدار هستند و با انتشار اشعه β یا γ تجزیه می شوند. هر ایزوتـوپ دارای زمـان نـیم عمر مشخصی بوده، اشعه منتشر شده (اشعه γ) از آن نیز دارای انرژی مشخصی است. با اسـتفاده از ایـن روش می توان تعداد زیادی از عناصر را تشخیص داد و به طور کمی اندازه گیری کرد.

سنگ های معدنی معمولا متشکل از تعدادی کانی هستند که هر کانی نیز از تعدادی عنصر تشکیل شده اسـت و لذا امکان دارد در اثر تداخل اشعه های منتشر شده از عناصر مختلف، تشخیص کانی مورد نظر مواجه با اشکال شود. در این قبیل موارد می توان با استفاده از تجزیه کننده ارتفاع نوسانات و همچنین فیلترهای مخصوص برای جلوگیری از طول موج هایی خاص، امکان تشخیص کانی مورد نظر را فراهم کرد.

٤-٢-٢-١- استفاده از اشعه X

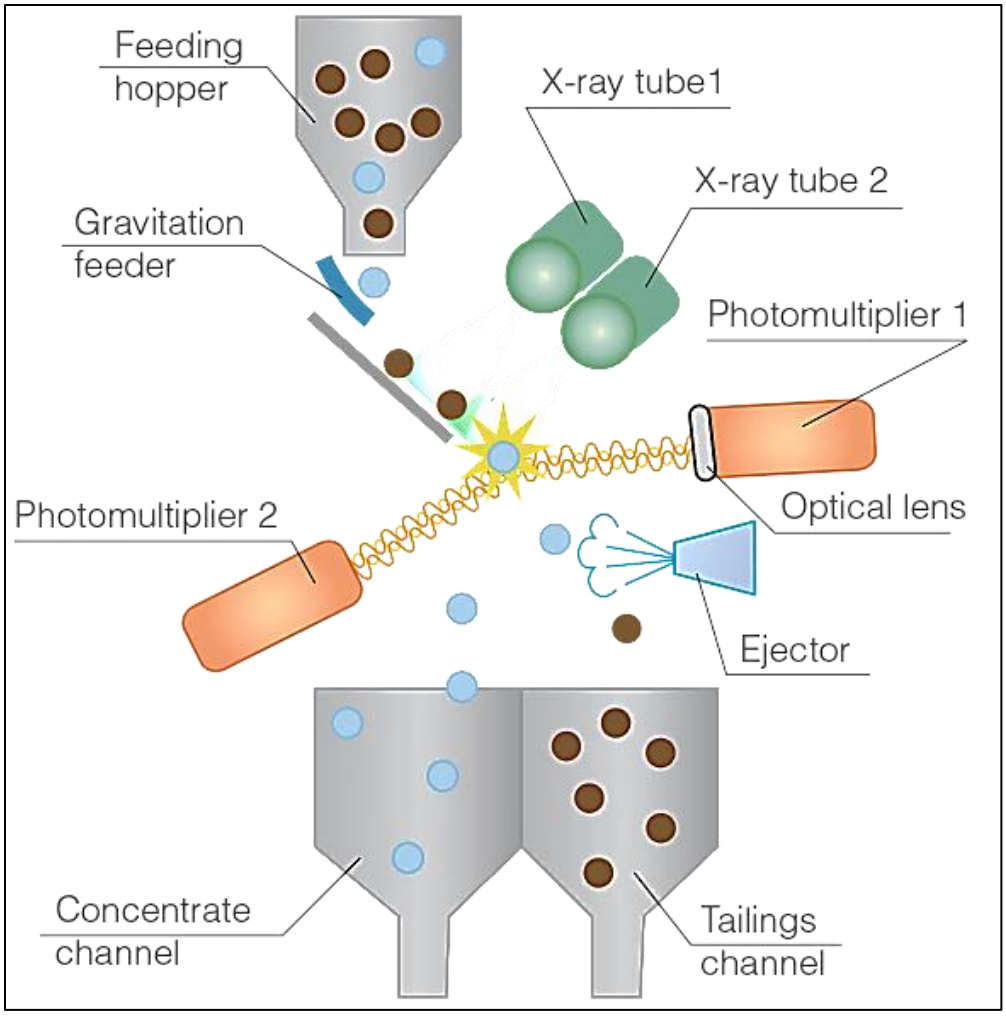
بمباردمان مواد توسط اشعه X باعث آزاد شدن نوترن می شود. این عمل را می توان عکس فعال کـردن توسـط بمباردمان نوترنی دانست. نمونه بارزی از این پدیده در بریلیوم مشاهده شده است. نوترن هـای منتشـر شـده را می توان توسط کنتوری مناسب اندازه گیری کرد. با استفاده از شتاب دهنده های الکترون، حساسیت ایـن روش افزایش می یابد و به این ترتیب امکان تشخیص و جداکردن کانی های حاوی سرب، جیوه، اورانیوم، تنگسـتن، لیتیوم، آهن و خاک های نادر وجود دارد.

با توجه به این که میزان نفوذ اشعه X در مواد، بستگی به چگالی آن ها دارد، از این خاصیت نیز می تـوان بـرای تشخیص و جدا کردن کانی هایی با چگالی های مختلف استفاده کرد. در این سیستم مطـابق شـکل ۲-۱۰ یـک رشته اشعه X بر روی صفحه حساس(معمولا سنتیلومتر) متمرکز شده است. دانه های بـار اولیـه از مقابـل ایـن اشعه عبور داده می شوند. دانه هایی که چگالی آن ها کم باشد، اشعه را از خود عبور می دهند، حال آن که دانه هایی با چگالی زیاد، مانع عبور اشعه و برخورد آن به صفحه حساس می شوند. به این ترتیب، با تبدیل تغییرات اشعه برخورد کرده به صفحه حساس به علائم الکتریکی، می توان دانه هـا را از یکـدیگر جـدا کـرد. مثـالی از کاربرد این روش جدا کردن دانه های الماس از گانگ همراه آن است.



شکل ۲-۱۰- اصول کار دستگاه سنگ جوری توسط اشعه X عبور کرده

در عمل بیشتر از خاصیت فلوئورسانس اشعه X برای تشخیص کانی ها استفاده می شود. به این منظور دانه های بار اولیه در محفظه ای کاملا تاریک در معرض یک رشته اشعه X با شدت زیاد قرار می گیرند. در ناحیه بازتاب آن یک سری فتوسل (و افزاینده فتوالکتریک برای تقویت نور مرئی حاصله) قرار گرفته است که نور مرئی منتشر شده از بعضی کانی ها (مثل الماس) را اندازه گیری می کند و به این ترتیب می توان این کانی ها را از سایر کانی ها جدا کرد. با استفاده از این روش می توان دانه های الماس با هر شکل و رنگی (حتی سیاه رنگ) را تشخیص داد. اصول کار این روش در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱- اصول کار دستگاه سنگ جوری توسط فلوئورسانس اشعه X

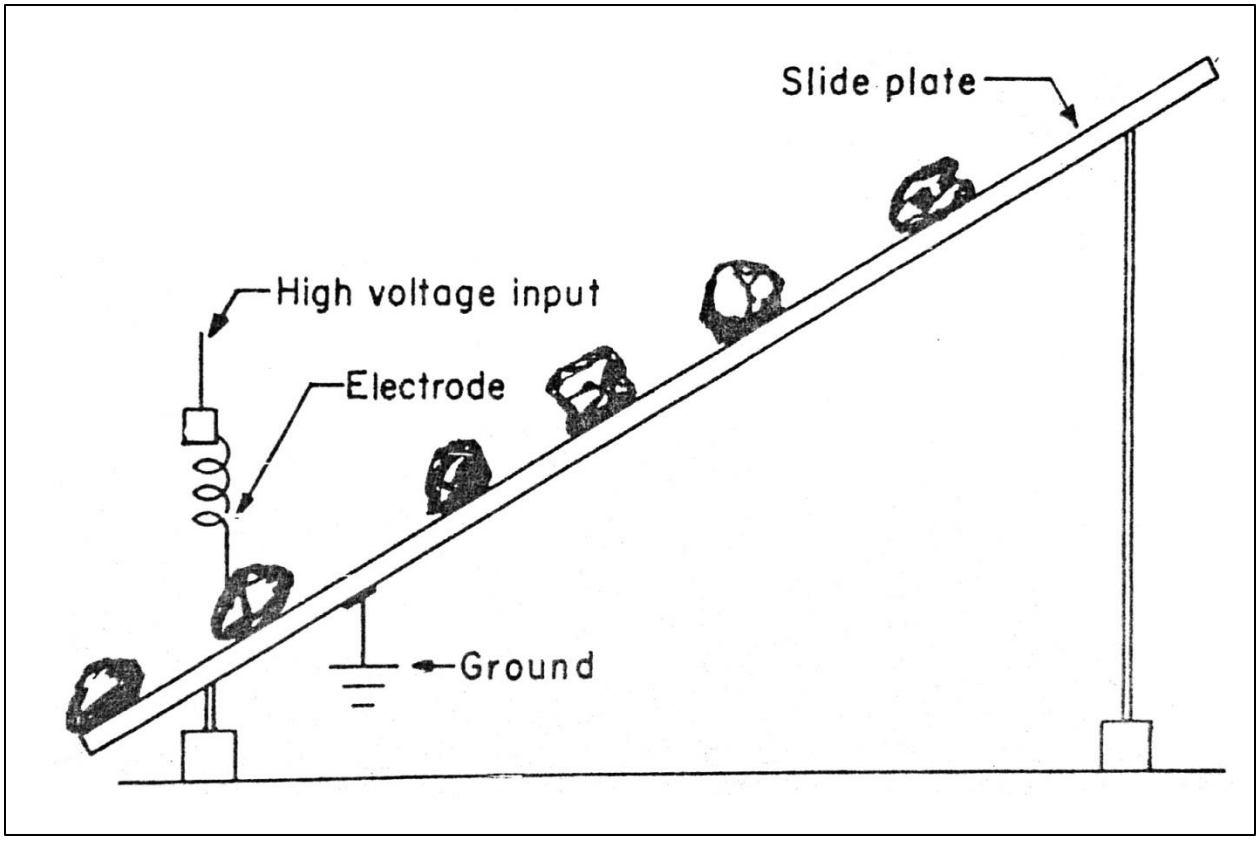
٤-۲-۳- امواج رادیویی

یکی از روش های غیر رایج برای تشخیص کانی ها، اختلاف قابلیت نفوذ امواج رادیویی در آن هاست. از این روش برای تشخیص مس چکشی (ناتیو) استفاده شده است. همچنین بر مبنای این روش می توان موادی با چگالی زیاد را که مانع نفوذ امواج رادیویی می شوند، تشخیص داد. در این روش تشخیص فلزات از طریق یک سیم پیچ که در مدار نوسان ساز (اسیلاتور) فرکانس رادیویی قرار دارد صورت می گیرد. نوسانات این نوسان ساز با یک نوسان ساز مرجع مخلوط می شود و تولید پالسی با فرکانس کم می کند. با قرار گرفتن یک قطعه فلزی در میدان سیم پیچ، فرکانس نوسان ساز تغییر می کند و در نتیجه فرکانس پالس را نیز تغییر می دهد. بر مبنای این تغییرات می توان نوع فلز را نیز تشخیص داد.

٤-٢-٤- هدایت الکتریکی

بسیاری از کانی ها، هادی جریان الکتریسیته هستند. هدایت الکتریکی کانی ها به ترکیب شیمیایی آن ها بستگی دارد و در بسیاری از موارد اختلاف هدایت الکتریکی بین کانی های مختلف زیاد است. با اندازه گیری شدت جریان عبور کرده از قطعات سنگ معدنی، می توان آن ها را از یکدیگر تشخیص داد. قطعاتی که جریان عبور کرده از آن ها از حدی بیشتر باشد، تولید علائم الکتریکی می کنند که به کمک این علائم می توان آن ها را از سایر قطعات جدا کرد.

با توجه به این که شکل، ابعاد و توزیع کانی های مختلف در قطعات سنگ معدنی بسیار متغیر است، لذا حتی قطعاتی که از نظر ترکیب شیمیایی مشابه یکدیگر هستند، ممکن است شدت جریان های بسیار متفاوتی را از خود عبور دهند. بنابراین برای آن که بتوان از این روش در عمل استفاده کرد، باید هدایت الکتریکی کوچکترین دانه کانی مورد نظر حداقل چهار برابر هدایت الکتریکی هادی ترین دانه های کانی های همراه باشد. دانه هایی که در حد فاصل این دو بخش باشند، به طور اتفاقی به یکی از دو بخش منتقل می شوند. وسیله تشخیص دانه ها مطابق شکل ۲-۱۲ از یک ناو شیبدار که از نظر الکتریکی به زمین متصل است و یک الکترود که از بالا آویزان شده و فاصله کمی با سطح ناو دارد، تشکیل شده است. دانه ها بر روی ناو شیبدار به حرکت در می آیند و با عبور از زیر الکترود، جریان الکتریکی برقرار می شود. شدت این جریان بستگی به هدایت هر یک از دانه ها دارد.



شکل ۲-۱۲- سنگ جوری به روش هدایت الکتریکی

چنانچه بار اولیه مرطوب باشد، برای جلوگیری از اختلال در شدت جریان عبور کرده، لازم است اختلاف پتانسیل بین سطح شیب دار و الکترود حتی المقدور کم باشد. کارائی این روش برای جداسازی مواد هموژن (به عنوان مثال جداسازی هماتیت از شیست) بسیار خوب است. همچنین از این روش می توان در مورد مواد متخلخل نیز استفاده کرد. به این منظور بار اولیه ابتدا به طور کامل در آب غوطه ور شده، سپس آبکش می شود. میزان آب جذب شده و باقیمانده در دانه ها بستگی به تخلخل آن ها دارد. بنابراین هدایت الکتریکی دانه های متخلخل کمتر از هدایت الکتریکی دانه های غیر متخلخل است. در صورتی که بار اولیه خشک باشد، باید از اختلاف پتانسیل زیاد (۵ تا ۲۰ کیلو ولت) استفاده کرد. در این حالت نیازی نیست که الکترود به دانه ها متصل باشد، زیرا با عبور دانه های هادی از فضای زیر الکترود، قوس الکتریکی ایجاد می شود. بدین ترتیب مشکلات ناشی از عدم اتصال کامل بین الکترود و قطعات سنگ و یا پوشیده بودن سطح دانه ها از نرمه سایر مواد نیز برطرف می شود.

٤-٢-٥- هدایت حرارتی

در سنگ جوری آزبست می توان از هدایت گرمایی پایین آن استفاده کرد. برای این کار با حرارت دادن متوالی و اندازه گیری هدایت حرارتی، آزبست از گانگ جدا می شود.

٤-٢-٦- روش های جدیدتر

در روش هایی که اخیرا توسعه پیدا کرده اند از تکنولوژی های جدید همچون هوش مصنوعی استفاده می شود. در یکی از این روش ها ابتدا دانه ها تحت اشعه مایکروویو قرار می گیرند. سرعت گرم شدن کانی های مختلف در برابر امواج مایکروویو متفاوت است. از این تفاوت استفاده کرده و توسط یک ترمومتر مادون قرمز غیر تماسی، دانه های مورد نظر را انتخاب و جداسازی می کنند. در روش استفاده از طیف سنجی فروشکست القائی لیزری یا LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy)، نور لیزری برگشتی از سطح کانی ها اندازه گیری می شود و چون شدت این نور بستگی به خواص نوری کانی دارد، می توان آن ها را از هم جدا نمود. از روش های آنالیز تصویری نیز برای شناسایی و جدایش برخی کانی ها استفاده می شود. به این ترتیب که عکس برداری کامل از ذرات صورت گرفته و توسط کامپیوتر با بانک اطلاعاتی آن مقایسه می شود. سنگ جوری می تواند با استفاده از خواص مغناطیسی و الکتریکی کانی ها نیز صورت پذیرد. تکنیک های عکس برداری مادون قرمز نیز گاهی مورد استفاده قرار می گیرند. گاه بیش از دو پارامتر مورد اندازه گیری قرار گرفته و نتایج توسط یک سیستم هوش مصنوعی (معمولا شبکه عصبی) تجزیه و تحلیل می شود.

٤-٣- بخش جداسازی

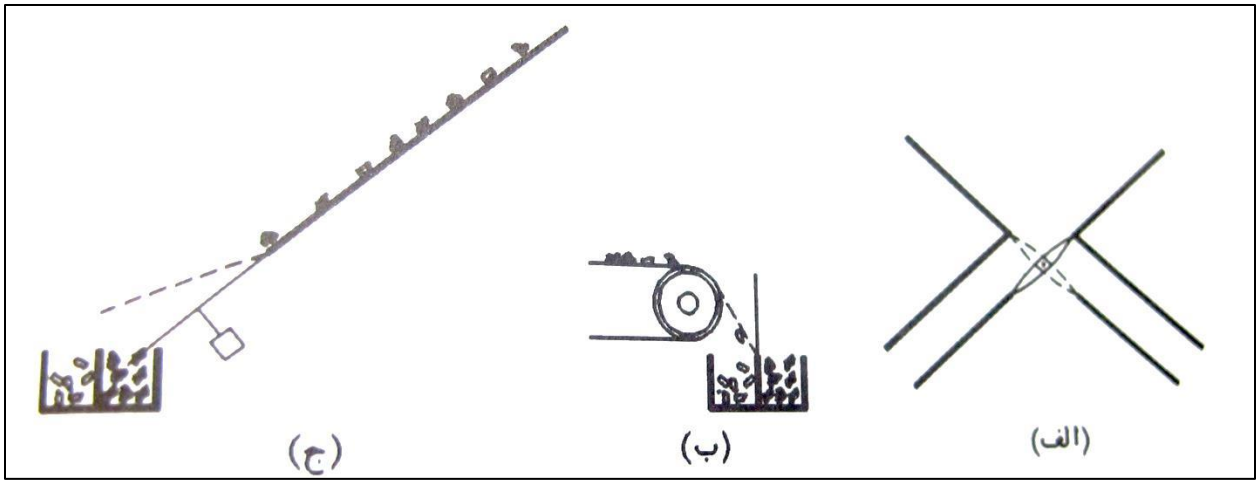
در بخش جداسازی دانه هایی که تشخیص داده شده اند و تصمیم به جدا کردن آن ها گرفته شده است، می باید به طور دقیق جدا شوند.

عوامل اساسی در سیستم جداسازی سرعت عمل، دقت و دوام سیستم است. از سیستم های جداسازی که برای روش های مختلف سنگ جوری مورد استفاده قرار گرفته اند، شیرهای الکتریکی دارای کاربرد بیشتری هستند. این شیرها ایجاد جریانی کوتاه و سریع از هوای فشرده در یک انژکتور می کنند. این روش دارای دقت خوبی

است. به علاوه دوام آن زیاد است و تقریبا نیاز به نگهداری ندارد. انواع دیگر وسایل مکـانیکی، دارای اینرسـی بیشتر و در نتیجه سرعت کمتر هستند و نیاز به نگهداری بیشتری دارند.

با توجه به این که دانه ای که در حال سقوط آزاد است را می توان با ضربه کوچکی در جهت عمود بـر جهـت حرکت، از مسیر خود منحرف کرد، در سیستم های سقوط آزاد معمولا از هوای دمشی استفاده می شـود. مـدت زمان و جهت هوا را می توان به دقت تنظیم کرد به نحوی که ضربه هوا تنها دانه های مورد نظر را جدا کند. این روش هم برای مواد نسبتا دانه درشت و هم برای مواد دانه ریـز، مناسـب اسـت. در ایـن روش لازم اسـت کـه سیستم هوا شامل شیرها، مسیرها و انژکتورها و فشار هوا برای دانه های مورد نظر به طور صـحیح تنظـیم شـده باشند. با این روش و با استفاده از هوایی با فشار ۶۰۰ کیلو پاسکال به کمک شیرهای ۲۵ میلی متری مـی تـوان قطعاتی به وزن ۷۰ کیلوگرم را با سرعت ۵ متر بر ثانیه به جلو پرتاب کرد. از این سیستم به طور رایج برای جدا کردن دانه هایی تا ابعاد 1.5 میلی متر برای جدا کردن ۷۰۰ دانه در دقیقه استفاده می شود. میزان هوای مصـرف شده به پارامترهایی از قبیل سرعت بار ورودی، عیار، ابعاد و چگالی دانه های با ارزش بستگی دارد.

روش های بسیار متنوع دیگری نیز برای جداسازی مورد استفاده قرار گرفته اند. در ابـداع ایـن روش هـا، قـوه ابتکار نقش مهمی را ایفا می کند. به عنوان مثال، برای جدا کردن مواد با چگالی کم در موارد زیـادی از تخلیـه کرونا استفاده شده است. در بعضی از سیستم ها نیز برای جدا کردن دانه ها از فشار آب اسـتفاده مـی شـود. در تعدادی از سیستم ها از دریچه های مکانیکی می توان استفاده کرد. این دریچه ها معمولا بخشی از محل سقوط دانه ها یا سطح شیبداری را تشکیل می دهند که می توانند با جابجا شدن، مسیر حرکت دانه ها را تغییـر دهنـد. گاهی نیز این دریچه ها از صفحه ای تشکیل شده اند که با حرکت حـول یـک لـولا، مـواد را بـه بخـش هـای مختلف هدایت می کنند. شکل ۲-۱۳ بعضی از سیستم های جداساز دریچه ای را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۳- بعضی از سیستم های جداساز دریچه ای

۵- تمیز کردن هوایی از طریق سایش (Air scrubbing)

در این روش سعی می شود درگیری بخش های دانه ریز ناخالصی ها را با بخش دانـه درشـت کـانی بـا ارزش توسط سایش دانه ها با یکدیگر از بین برد و همزمان با آن به کمک جریانی از هوا، دانه های ناخالصی آزاد شده را از محیط خارج کرد. بنابراین با حذف بخش سایش، این وسیله مشـابه کلاسـیفایرهای هـوایی کـار کـرده، از همان اصول تبعیت می کند. ابعاد دانه های بار اولیه در این روش ممکن است تا حدود ۳ میلیمتر و حتی درشت تر از آن باشد و ناخالصی های همراه نیز ممکن است 0.8 میلیمتر تا 10 میکرون باشند.

کاربرد این روش در تهیه بار اولیه بعضی از روش های آرایش خشک مانند روش های مغناطیسی با شدت زیاد و یا روش های الکتریکی است. همچنین از این روش برای آرایش ماده ای با دانه بندی مشخص کـه بـا روش های دیگر میسر نیست، استفاده می شود. در بعضی موارد نیز تنها با استفاده از این روش می توان به محصـولی با کیفیت مورد نظر دست یافت.

٦- میزهای چرب

دانه هایی که سطح آن ها هیدروفوب است، در حین عبور از روی سطوحی که سطح آن هـا توسـط لایـه ای از چربی پوشیده شده است، به آن سطح می چسبند و از بقیه مواد جدا می شوند. از موارد عمده کاربرد این روش، آرایش الماس است. لازم به توضیح است که الماس موجود در کمبرلیت غیر هوازده دارای سطوح هیـدروفوب

است، حال آن که الماس موجود در کمبرلیت هوازده، قلوه سنگ های دریایی و سایر منابع آبرفتی هیدروفیل می باشد. به این نوع الماس اصطلاحا "الماس مقاوم" (refractory diamond) می گویند. به عنوان سطوح چرب از روش های مختلفی استفاده شده است.

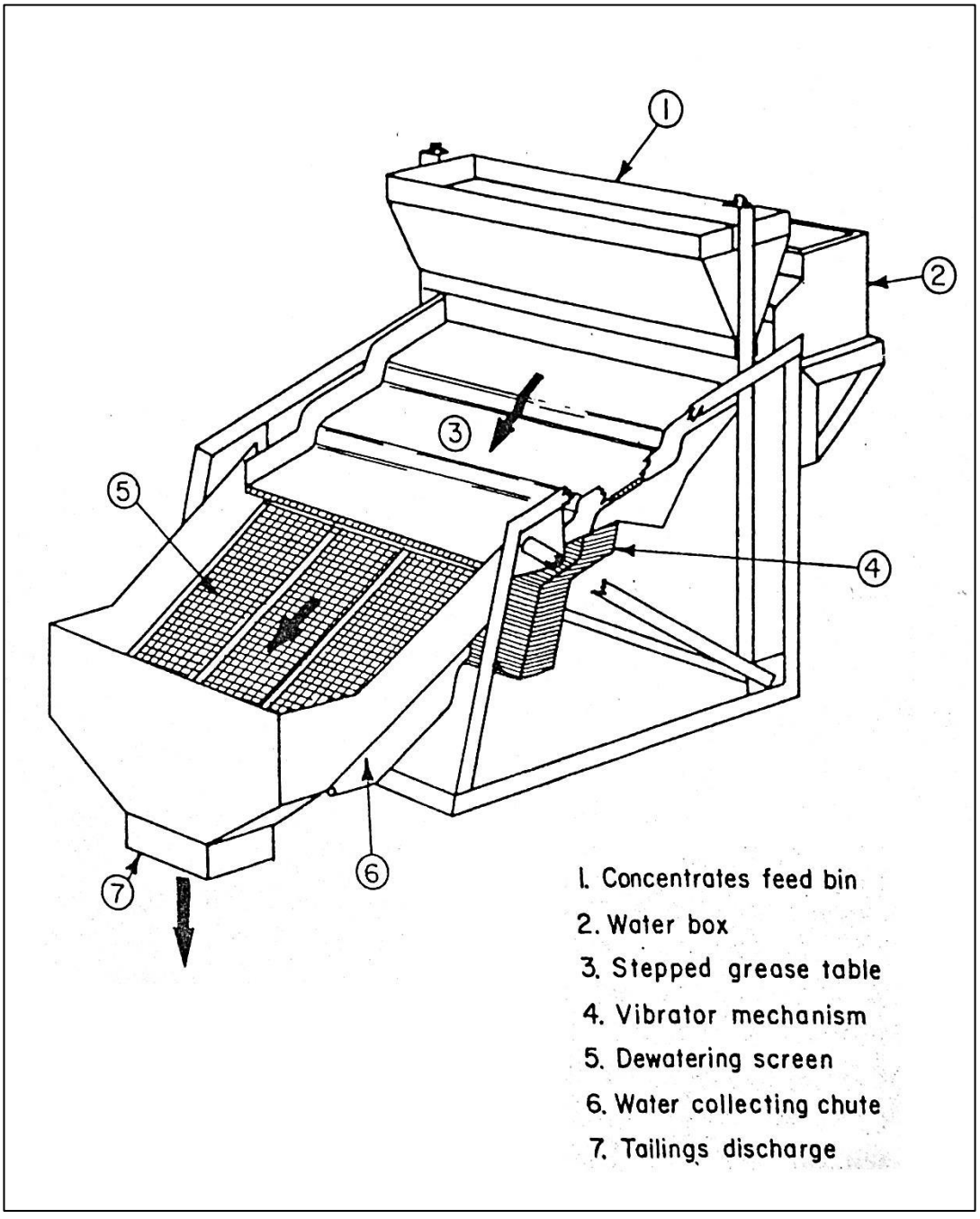
٦-١- میزهای چرب لرزان

این نوع میز در سال ۱۸۹۶ ابداع و در سال ۱۹۴۰ نیز از رده خارج شده است. این نوع میز از یک سطح فولادی به ابعاد ۲۰۰×۷۰ سانتی متر که به طور معلق قرار گرفته، تشکیل شده است. سطح میز دارای شیبی است که مقدار آن بستگی به ابعاد بار ورودی دارد. بار اولیه این میز باید دارای دانه بندی محدود باشد. به این منظور در محدوده کاربرد آن که 6.4 تا 1.6 میلی متر است، مواد به ۶ بخش با دانه بندی محدود تر تقسیم می شوند. میز در جهت عمود بر شیب دارای حرکتی جانبی است. دامنه و فرکانس این حرکت نیز به ابعاد بار اولیه بستگی دارد. بر روی سطح میز جریانی از آب برقرار است که باعث حمل دانه های ماده معدنی می شود. ضمنا سطح دانه های گانگ نیز در این جریان آب، تر می شود و لذا این قبیل دانه ها تمایلی به چسبیدن به لایه روغن نخواهند داشت. روغن مورد استفاده بر روی این میزها روغن گریس، از مشتقات نفت است که با موم مخلوط شده است و به این ترتیب دارای سختی مناسبی شده است. سطح میز توسط لایه ای به ضخامت ۶ میلی متر از این ماده پوشیده می شود.

٦-٢- میزهای چرب ارتعاشی

این نوع میز که هنوز در بعضی مناطق مورد استفاده قرار می گیرد از جنس آلومینیوم به ابعاد ۹۰×۱۲۰ سانتی متر بوده، شامل چهار پله هر یک به عرض ۲۳ و ارتفاع ۱۰ سانتی متر است. شکل ۲-۱۴ این دستگاه را نشان می دهد. این مجموعه توسط یک مکانیزم الکترو مغناطیسی به ارتعاش در می آید. ارتعاشات باید به نحوی تنظیم شود که از حرکت رو به پایین دانه ها جلوگیری کنند. شدت ارتعاشات برای هر نوع بار اولیه ای ثابت باقی می ماند و عملیات با تغییر شیب میز، میزان بار ورودی و حجم آب تنظیم می شوند. سطح میز معمولا توسط لایه ای از موم سخت پوشیده شده است. سطح این لایه را نیز لایه نازکی از روغنی سبک از مشتقات نفت می پوشاند. بار اولیه همراه با آب بر روی پله اول ریخته می شود. دانه های هیدروفوب تمایل به چسبیدن بر روی

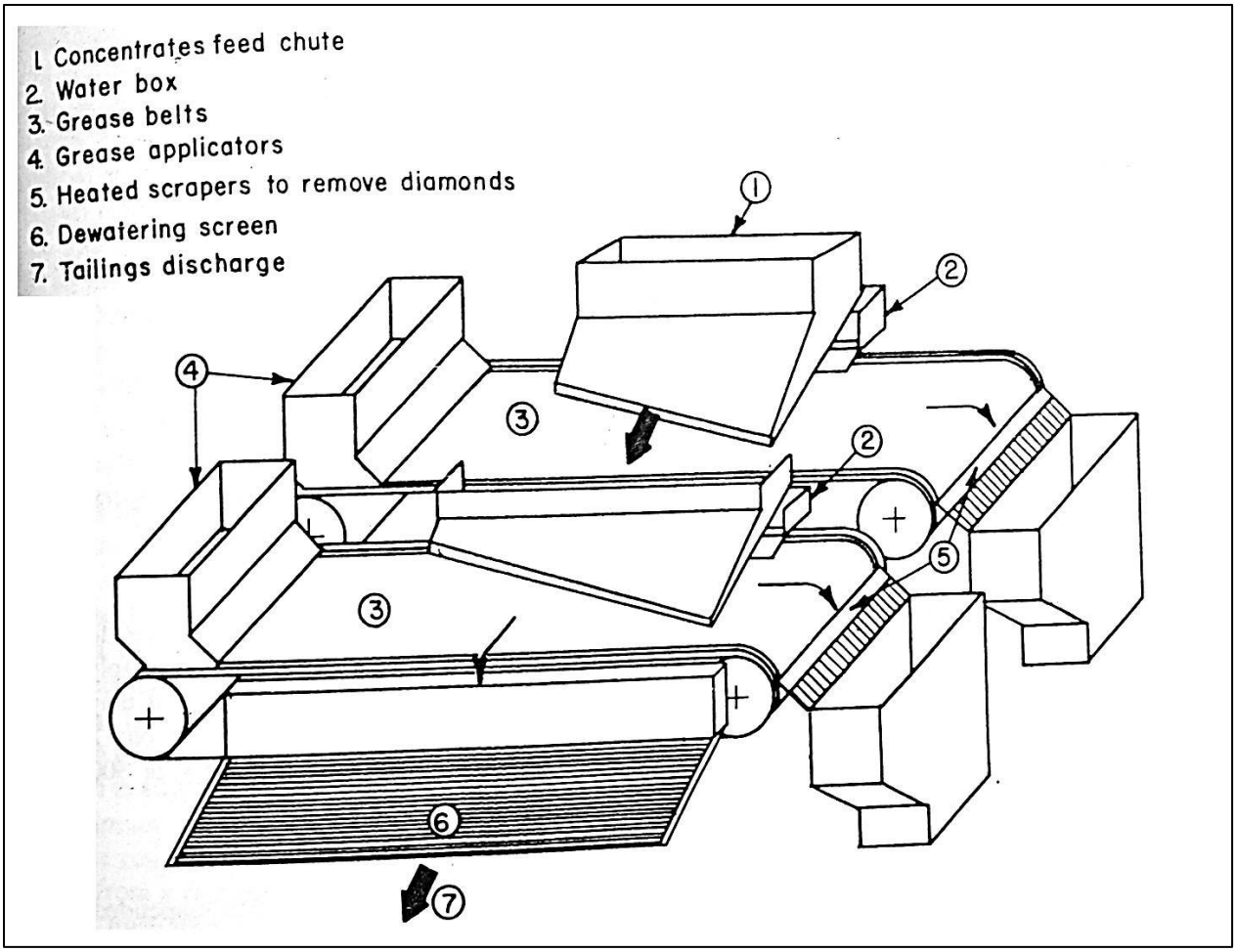
لایه روغن را دارند، حال آن که سایر دانه ها همراه با آب به پله های بعدی منتقل شده، از پایین میز خارج مـی شوند.



شکل ۲-۱۴- میز چرب ارتعاشی

٦-٣- نوارهای چرب

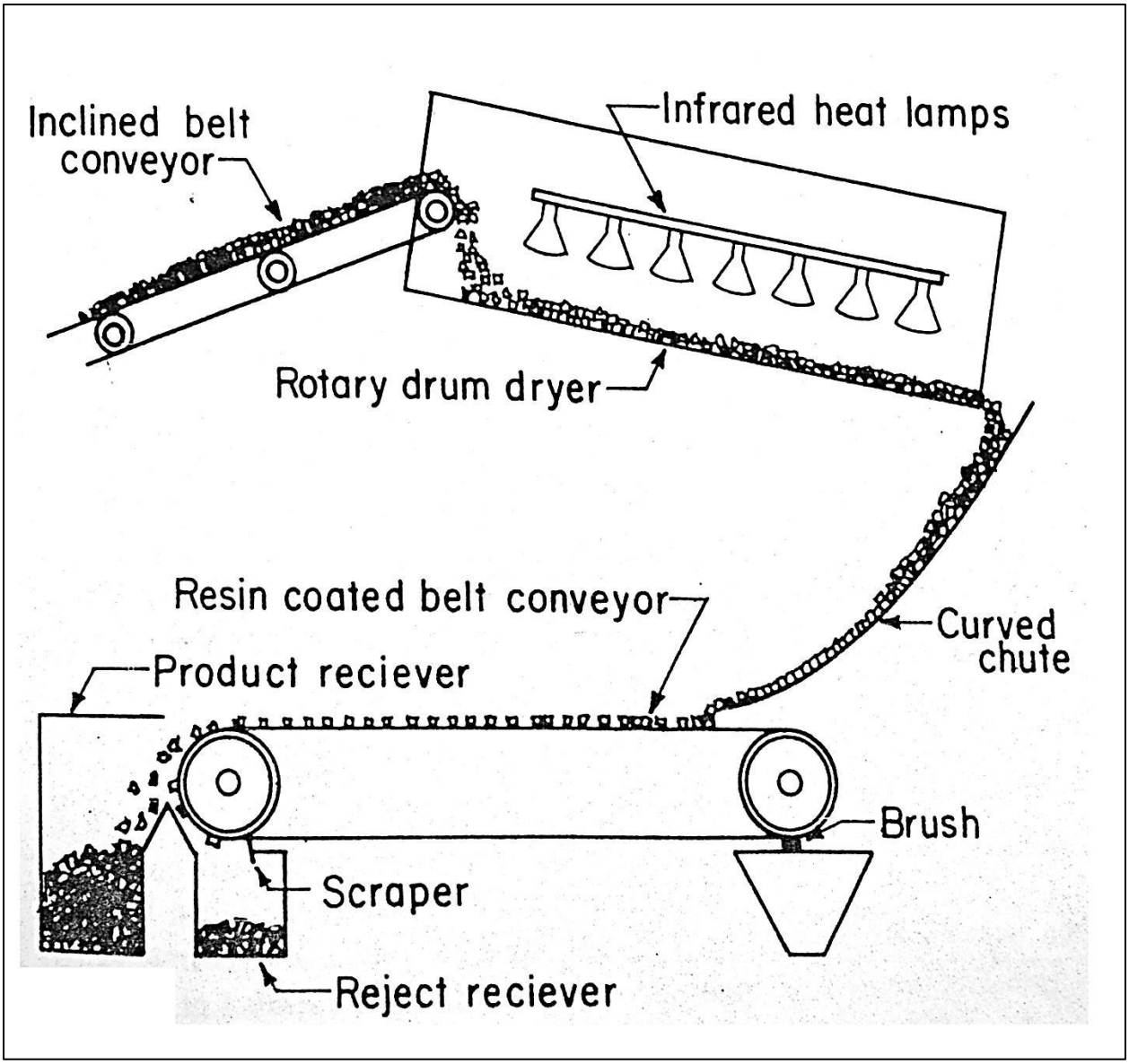
این وسیله برای بازیابی نوعی الماس (هوازده یا آبرفتی) توسعه یافته است که نیاز به یک مرحله آماده سازی داشته باشد. این وسیله از یک نوار نقاله به عرض ۵۰ سانتی متر که توسط دو فلکه به قطر ۳۰ سانتی متر به حرکت در می آید، تشکیل شده است. فاصله مرکز فلکه ها از یکدیگر ۲ متر است. شکل ۲-۱۵ این وسیله را نشان می دهد. سرعت حرکت نوار ۷ سانتی متر بر ثانیه است و به منظور آن که سطح نوار کاملا مسطح باقی بماند در زیر آن صفحه ای قرار گرفته است که می توان زاویه آن را در جهت عرض نوار تغییر داد. این زاویه بستگی به ابعاد بار اولیه دارد و معمولا ۱۲ تا ۱۵ درجه نسبت به خط افق است. بار اولیه توسط دو تخلیه کننده ارتعاشی بر روی لبه بالایی نوار و در جهت عمود بر حرکت نوار ریخته می شود. مشابه میزهای چرب، آب از طریق مخزنی بر روی نوار جریان می یابد تا باعث حرکت دانه ها بر روی نوار شود. دبی آب بستگی به ابعاد دانه ها دارد. سطح نوار در عرضی معادل ۴۵ سانتی متر توسط لایه ای از چربی به ضخامت تقریبی ۱۲ میلی متر پوشیده می شود. به علاوه، محلی برای روغن کاری سطح نوار پیش بینی شده است که با عبور نوار از آن قسمت، لایه ای از روغن تازه به ضخامت 0.4 میلی متر بر روی نوار قرار می گیرد. دانه های الماس به لایه روغن می چسبند و سایر دانه ها با جریان آب از لبه نوار خارج می شوند.



شکل ۲-۱۵- نوار چرب

۷- چسبندگی حرارتی

از روش چسبندگی حرارتی به طور موفقیت آمیز برای جدا کردن ناخالصی های موجود در نمک استفاده شده است. در اساس، این روش شامل قرار دادن سنگ معدنی در معرض تشعشع حرارتی است که به طور انتخابی باعث گرم شدن ناخالصی ها می شود. دانه های گرم شده می توانند بر روی لایه ای حساس به حرارت که در سطح یک نوار نقاله قرار گرفته است، بچسبند و به این ترتیب جدا شوند. شکل ۲-۱۶ اصول کار این روش را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۶- تمیزکردن به روش چسبندگی حرارتی

فصل سوم

جداسازی ثقلی

۱- مقدمه

روش های ثقلی پر عیار کنی برای آرایش بسیاری از کانی ها مورد استفاده قرار می گیرند. دامنه کـاربرد آن هـا بسیار وسیع است و برای کانی هایی با چگالی نسبتا زیاد (مانند سولفور فلزات سنگین) تا موادی با چگالی کـم (مانند زغالسنگ) به کار می روند.

هر چند با گسترش روش فلوتاسیون این روش اهمیت خود را از دست داده اسـت امـا هنـوز روش عمـده ای برای آرایش کانه های آهن و تنگستن است. در مورد قلع نیز اگرچه فلوتاسیون کاسیتریت از دهـه ۱۹۷۰ رایـج شده است ولی هنوز ۸۵٪ از قلع جهان از طریق ثقلی آرایش داده می شود. در مورد کانی هایی که درجه آزادی آن ها در ابعادی بزرگتر از حد قابل قبول برای فلوتاسیون (۲۵۰ میکرون) به میزان مناسبی برسد، از روش هـای ثقلی استفاده می شود. مزیت روش های ثقلی نسبت به فلوتاسیون در هزینه به مراتب کمتر آن هاست.

در سال های اخیر شرکت های متعددی اقدام به استفاده مجدد از روش های ثقلی کرده اند. این امر عمدتا ناشی از افزایش قیمت مواد شیمیایی مورد مصرف در فلوتاسیون، سادگی نسبی روش های ثقلـی و آلـودگی زیسـت محیطی کمتر این روش هاست. با دست یابی به روش های ثقلی جدید، امکان آرایش کانی هایی با ابعاد ۱۰ تـا ۵۰ میکرون نیز فراهم شده است. در بسیاری از حالات می توان از آرایش ثقلی برای پر عیار کردن اولیه خوراک استفاده نموده و در مصرف انرژی (برای خردایش) و مواد شیمیایی صرفه جویی نمود.

با ابداع روشهای ثقلی جدید که قابلیت آرایش مواد در ابعاد کوچکتر را دارند، امکان بازیابی کانی های سـنگین باقیمانده در باطله فلوتاسیون (در حال کار یا مربوط به کارهای قدیمی) به وجود آمده است.

۲- اصول حاکم بر جداسازی ثقلی

روش پر عیار کنی ثقلی، فرآیندی است که برای جدایش یک یا چند کانی از باطله های همراه به کار می رود و بر مبنای حرکت نسبی ذرات در یک سیال، نیروی ثقل، نیروی گریز از مرکز و بعضـی نیروهـای دیگـر اسـتوار است. علاوه بر جرم مخصوص، وزن، شکل، ابعاد ذرات و همچنین نیروی مقاومت لایه های سیال نیز از جمله پارامترهای مهم در تعیین حرکت نسبی ذرات در این فرآیند هستند.

تاگارت در مورد قابلیت کاربرد روش های ثقلی رابطه زیر را ارائه داده است که به کمک آن می تـوان معیـاری برای سنجش کیفیت پرعیار کنی بدست آورد:

$$CC = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f}$$

در این رابطه:

CC معیار پر عیار سازی

D_h دانسیته کانی سنگین

D_f دانسیته سیال

D_l دانسیته کانی سبک

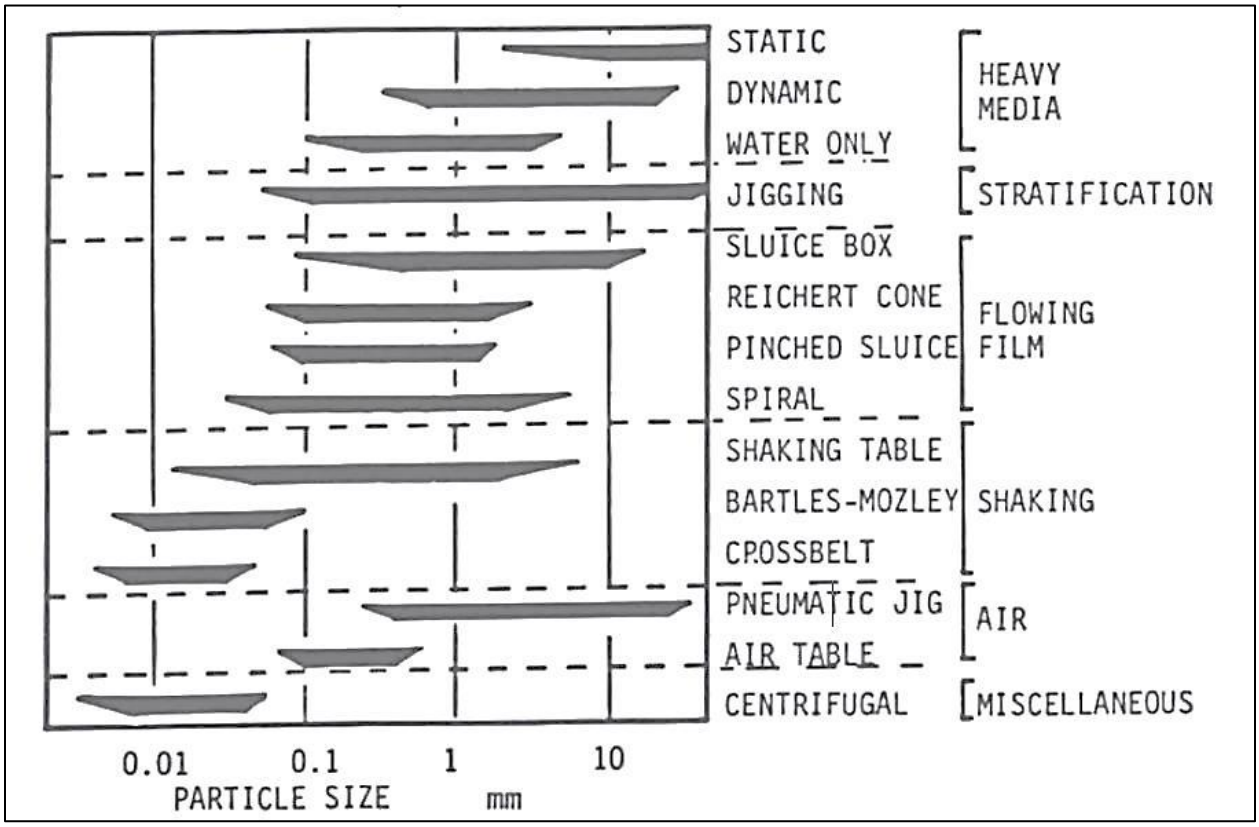
می باشد. مطابق رابطه بالا برای این که بتوان دو کانی سبک و سنگین را به روش ثقلی پر عیار کرد، بایستی بین دانسیته آن ها اختلاف قابل توجهی وجود داشته باشد. در این راستا تاگارت و آربیتر جدول زیر را ارئه دادند.

جدول ۳-۱- شرایط جدایش ثقلی با توجه به ابعاد ذرات نسبت به معیار پر عیار سازی

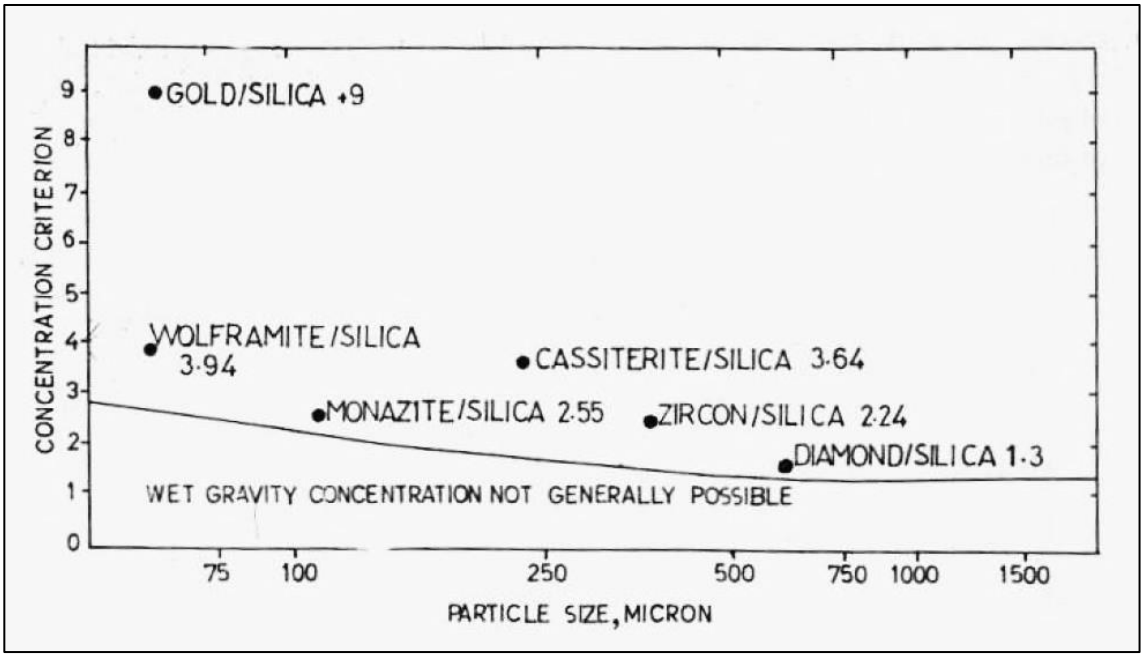
شاخص پرعیار سازی	محدوده ابعادی لازم و کیفیت جدایش
بزرگتر از ۲/۵	جدایش حتی برای ذرات ریزتراز ۷۴ میکرون نیز امکان پذیر است.
۲/۵ -۱/۷۵	جدایش فقط برای ذرات زیر ۱۰۰ مش امکان پذیر است.
۱/۷۵ -۱/۵	جدایش برای ذرات تا حد ۱۰ مش و به سختی امکان پذیر است.
۱/۵ -۱/۲۵	جدایش برای ذرات تا حد ۰/۲۵ اینچ ولی به سختی امکان پذیر است.
کوچک تر از ۱/۲۵	به جز موارد خاص امکان پذیر نیست.

بنابراین ذرات بایستی در محدوده نیوتنی باشند و ذراتی که ابعاد آن ها در ناحیه استوکس واقع است برای ایـن روش ها مناسب نیستند. شکل ۳-۱ محدوده ابعاد مناسب برای تجهیزات مختلف جداسازی را نشان مـی دهـد.

در شکل ۳-۲ نیز در منطقه بالای منحنی جداسازی ثقلی براحتی امکان پذیر و در منطقه زیر منحنی این جداسازی امکان پذیر نمی باشد.



شکل ۳-۱- محدوده ابعاد مناسب در تجهیزات مختلف جداسازی ثقلی



شکل ۳-۲- معیار پر عیار سازی نسبت به ابعاد ذرات

۳- مکانیزم روش های پر عیارسازی ثقلی

به طور کلی مکانیزم جدایش مواد معدنی در روش های ثقلی را می توان با توجه به نوع دستگاه به سه گروه زیر تفکیک نمود:

۱- دستگاه هایی که بر اساس حرکت قائم ذرات و یا لایه بندی ذرات استوارند. مانند جیگ و ...

۲- دستگاه هایی که بر اساس حرکت ذرات درسطوح شیب دار و یا جریان های لایه ای نازک آب و یا جریان های لایه ای آب استوارند. مانند: میز ها، ناوها، مارپیچ ها و....

۳- دستگاه هایی که بر اساس حرکت ذرات در یک سیال با جرم مخصوصی در حد واسط جرم مخصوص کانی سنگین و سبک استوارند. مانند جدا کننده های واسطه سنگین از نوع ثقلی(جدا کننده مخروطی، استوانه ای و...) یا از نوع گریز از مرکز (دایناویرپول، سیکلون واسطه سنگین، تری فلو و...).

۳-۱- مکانیزم جدایش در دستگاه های گروه اول

در این نوع وسایل مانند جیگ، حرکت متناوب آب، یک لایه بندی ایجاد می کند که طی آن ذرات به تناوب منبسط می شوند. چنانچه از نظر تئوری بتوان زمان سقوط ذرات با دانسیته های متفاوت را آن قدر کوتاه نمود تا تمامی طول طی شده فقط تحت تاثیر شتاب اولیه ذرات صورت گیرد و دیگر ته نشینی به سرعت حد و ابعاد ذرات وابسته نباشد، می توان به جدایش ایده آلی دست یافت. بدیهی است در زمان های طولانی ذره به سرعت حد رسیده و پارامتر شکل و ابعاد ذره نیز در حرکت آن موثر خواهد بود.

به طور کلی در این نوع دستگاه ها کنترل لایه بندی توسط چهار مکانیزم صورت می گیرد که با توجه به انتخاب پارامترهای عملیاتی می توان بسته به نوع دستگاه ترکیب مناسبی از آن ها را به کار گرفت. این نوع مکانیزم ها شامل شتاب دیفرانسیلی در شروع سقوط ذره، سقوط ذره، سقوط با مانع، شرایط حداقل سطح انرژی پتانسیل و چکیده شدن ذرات است.

۳-۲- مکانیزم جدایش در دستگاه های گروه دوم

جدایش مواد معدنی در لایه نازکی از آب انجام می شود که بر روی سطح شیبداری در جهتی مشخص در حال حرکت است. از فشار و تلاطم ایجاد شده توسط جریان آب می توان در طبقه بندی ذرات یک کانی مشخص از نظر ابعاد و یا ذراتی با ابعاد مشابه ولی دانسیته های متفاوت و یا جدایش ذراتی با ابعاد و دانسیته یکسان که از نظر شکل متفاوتند استفاده کرد. از سه مکانیزم عنوان شده ممکن است هر سه حالت به صورت همزمان صورت گیرد.

در این گونه تجهیزات، علاه بر جریان آب و نحوه تماس آن با ذرات، پارامترهای دیگری نیز دخیل هستند. پارامترهایی همچون مسیر حرکت ذره در محیط جدایش که خود نیز وابسته به نیروی دینامیکی آب، نیروی لرزاننده و یا نیروهای حاصل از پارامترهای طراحی (مانند نیروهای مارپیچی) و نیروی اصطکاک بین ذره و سطح شیب دار. در کلیه جداکننده هایی که با این مکانیزم کار می کنند، شیب بستر، ضخامت لایه، نسبت ته نشینی، رقت پالپ، خواص ماده معدنی و بسیاری دیگر، پارامترهای اساسی را تشکیل می دهند. انواع میزها، مخروط ها، اسپیرال ها، ناوها و نوار ها از این نوعند.

۳-۳- مکانیزم جدایش در دستگاه های گروه سوم

چنانچه دانسیته یک سیال (واسطه پایدار) حد فاصل دانسیته دو کانی باشد، کانی سنگین تر در آن غرق شده و کانی سبک تر شناور می گردد. دانسیته واسطه سنگین بایستی بسیار بیشتر از دانسیته آب باشد. لذا در این گونه تجهیزات از پودر مواد معدنی (مگنتیت، فروسیلیسیوم،..) همراه با آب به عنوان واسطه سنگین استفاده می شود. پایداری این پالپ از پارامترهای بحرانی جدایش است.

حد جدایش مشخص، میزان محصول تولید شده، بازیابی و ظرفیت بالا و کاهش هزینه های عملیاتی از جمله مسائلی هستند که در جدا کننده های واسطه سنگین باید به آن ها توجه داشت. جداکننده های ثقلی (استوانه ای، مخروطی و ...) و نوع گریز از مرکز (سیکلون، داینا ویرپول، ورسیل، لارکادم، تری فلو،..) از انواع این جدا کننده ها هستند.

٤- جیگ ها

جیگ، یکی از قدیمی ترین دستگاههای پرعیار کردن ثقلی مواد است که اصول کار آن هنوز به طور کامل شناخته نشده است. از این دستگاه معمولا برای پر عیار کردن مواد نسبتا دانه درشت استفاده میشود. جدایش کانی های سنگین از مواد همراه به کمک تشتک های شستشو (همانند روش های جستجوی طلا در بستر رودخانه ها) از دیرباز مرسوم بوده که بعد ها با ایجاد سوراخ هایی در سطح و حرکت بالا و پایین آب در مخزن آب، توسعه و تکامل یافته و مبنای مکانیزم جیگ های امروزی را تشکیل داده است.

طرز کار جیگ این گونه است که اگر سطح مشخصی در داخل جیگ به عنوان سطح مبنا در نظر گرفته شود، آب نسبت به این سطح دارای دو حرکت است، یکی رو به بالا یا حرکت جهشی و دیگری رو به پایین یا حرکت کششی، فرکانس این حرکت بین ۵۵ تا ۳۳۰ مرتبه در دقیقه متفاوت است. از جیگ نه تنها به عنوان روش اولیه و پیش فرآوری (مانند الماس، سرب، روی و..) بلکه به عنوان پر عیار سازی نهایی(مانند باریت، کرومیت، زغالسنگ و ...) نیز می توان استفاده کرد.

٤-١- اصول حرکت ذرات در جیگ

در ابتدای سقوط، در مرحله جهش، لایه تشکیل شده از ذرات به سمت بالا حرکت می کند و با کاهش سرعت به صفر می رسد و گویی ذرات از حالت سکون با شتاب و سرعت اولیه بر اساس دانسیته و مستقل از ابعاد سقوط می کنند و بدین ترتیب است که لایه منبسط می شود. ذرات موجود در بخش تحتانی لایه زودتر و سپس تمامی لایه به طرف پایین حرکت می کند. در مرحله کشش لایه به آرامی فشرده و در هر مرحله تکرار می شود. پس از بی حرکت شدن ذرات درشت، ذرات ریز از لابه لای این لایه عبور می کنند. برای بررسی شتاب ذره در شروع سقوط از معادله حرکت یک ذره در سیال استفاده می کنیم:

$$m\frac{dV}{dt} = \mathrm{mg} - m'g - D$$

در این معادله:

m جرم ذره

m' جرم سیال هم حجم با ذره

g شتاب جاذبه

D نیروی دراگ (نیروی مقاومت سیال)

V سرعت ذره

t زمان و

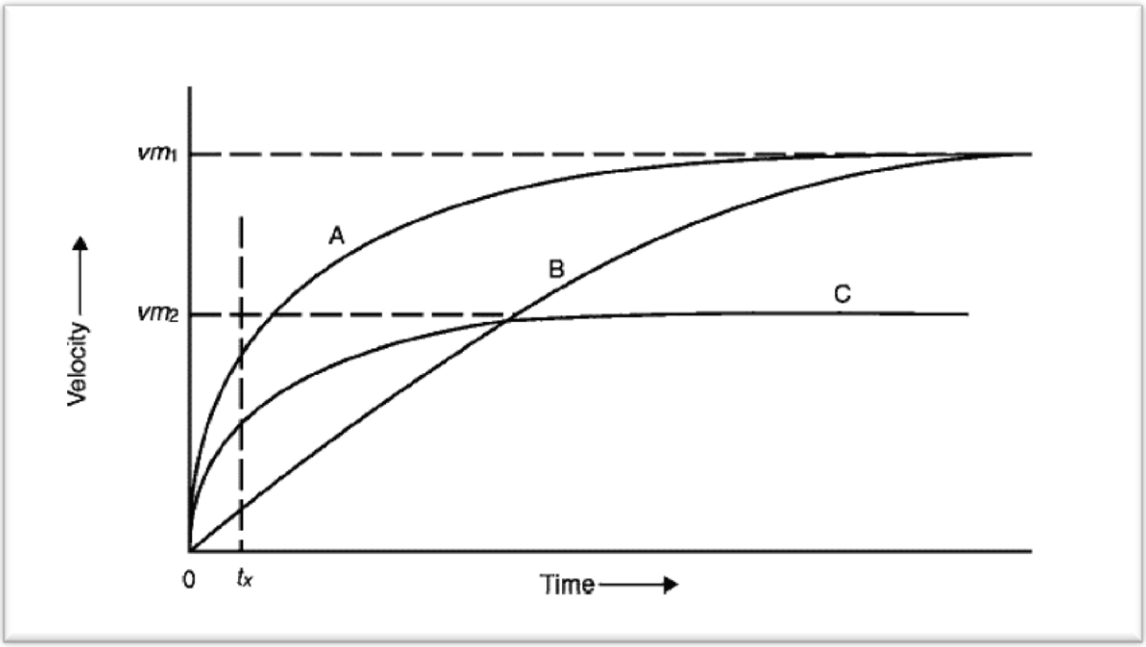
$\frac{dV}{dt}$ شتاب ذره

می باشد. در شروع حرکت چون سرعت ذره خیلی کم است می توان از نیروی دراگ صرف نظر کرد (D=0). بنابراین :

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{d_s v - d_f v}{d_s v}\right) g$$

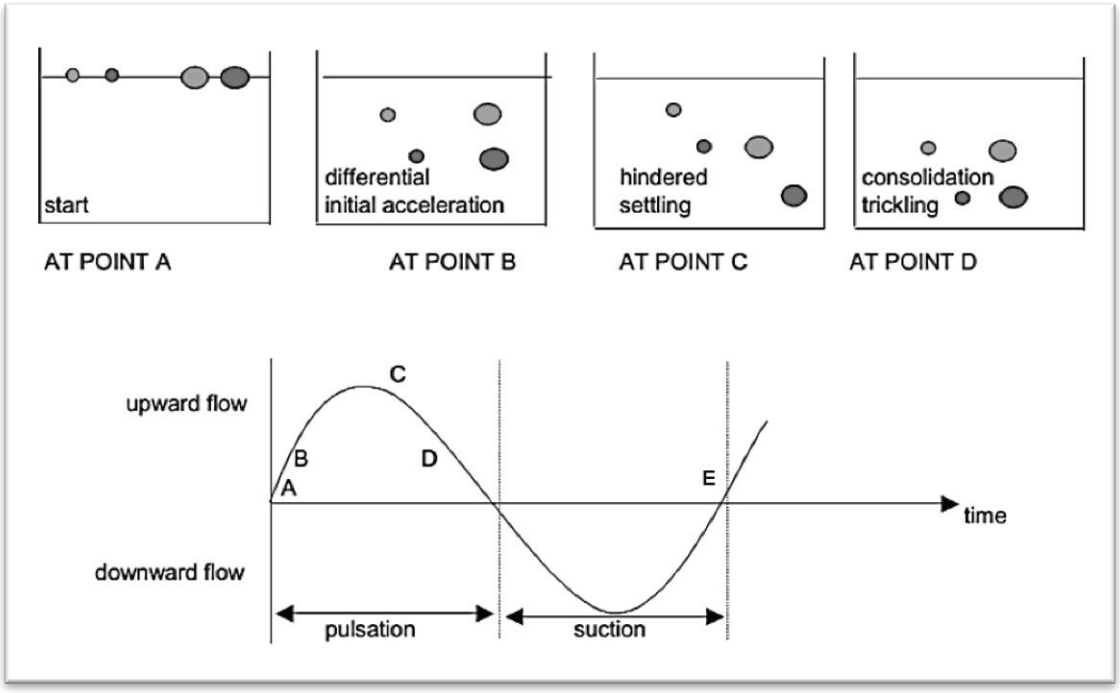
$$\frac{dV}{dt} = \left(1 - \frac{d_f}{d_s}\right) g$$

در این رابطه d_s ، d_f به ترتیب دانسیته ذره و سیال می باشد. مطابق این رابطه چنانچه از نظر تئوری زمان سقوط ذرات آنقدر کوتاه باشد که تمامی مسافت طی شده فقط تحت تاثیر شتاب اولیه قرار گیرد، دیگر ته نشینی به سرعت حد و ابعاد ذره بستگی نخواهد داشت و تنها تحت تاثیر دانسیته ذرات خواهد بود. بنابراین در جیگ ها، باید فرکانس نوسانات را به گونه ای تنظیم کرد که ذرات به سرعت حد خود نرسند و در نتیجه در فواصل زمانی کوتاه به تدریج بتوان ذرات سنگین و سبک را از یکدیگر جدا نمود. شکل ۳-۳ سرعت های سقوط اولیه سه ذره مختلف را مقایسه کرده است. در این شکل ذره A یک ذره سنگین و ذره B ذره ای سبک اما درشت که سرعت حد آن با ذره A یکی است. ذره C نیز یک ذره سنگین ریز تر از A است که سرعت حد کمتری نسبت به آن دارد. همانطور که در شکل پیداست، در زمان کوتاه t_x هر دو ذره A و C از ذره درشت کانی سبک، سرعت ته نشینی بیشتری دارند.



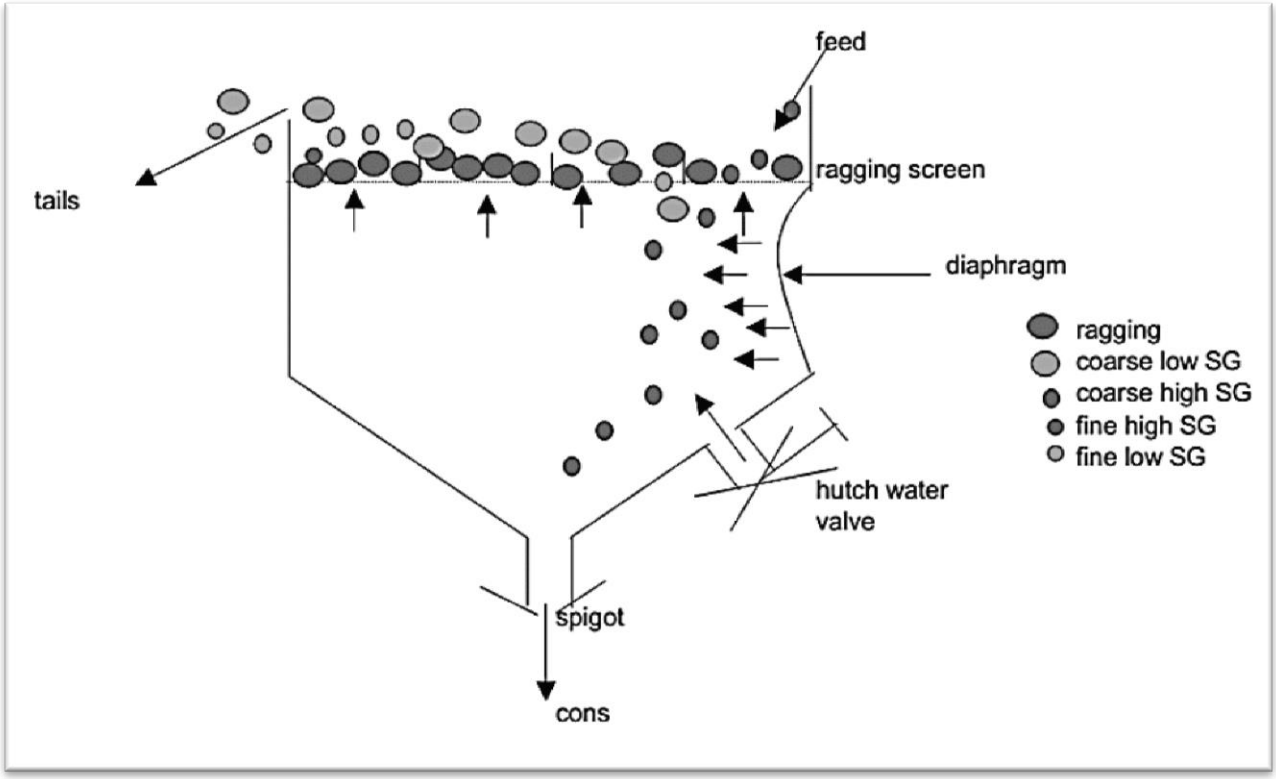
شکل ۳-۳- مقایسه سرعت های ته نشینی اولیه سه ذره مختلف (شرح در متن)

حرکت نوسانی آب در داخل جیگ توسط مکانیزمی(مانند پیستون) که دارای حرکت موجی یکنواخت است، ایجاد میشود. این حرکت در طول لایه بار اولی، ایجاد حرکت های جهشی و کششی میکند که این حرکت ها باعث لایه بندی مواد می شوند. ذرات سبکتر که در بالا قرار گرفته اند، از قسمت سرریز خارج می شوند و ذرات سنگین تر که در قسمت پایین لایه قرار گرفته اند، می توانند از قسمت ته ریز خارج گردند. شکل ۳-۴ حرکت نوسانی آب را داخل جیگ نشان می دهد. نقطه *A* شروع سرعت رو به بالای جریان را نشان می دهد. در این مرحله لایه منبسط شده و ذرات آزادتر می شوند. نقطه *B* مرحله ته نشینی با مانع در یک جریان رو به بالا را نشان می دهد. در این مرحله ذرات ریز توسط جریان رو به بالا به سمت بالا حرکت می کنند و معمولا همراه مواد باطله از محیط خارج می شوند. نقطه *C* سرعت رو به بالای آب را که به حداکثر خود رسیده را نشان می دهد. در چنین شرایطی کلیه ذرات حرکتی رو به بالا دارند. نقطه *D* ته نشینی ذرات درشت و سپس ذرات ریز را نشان می دهد. نقطه *E* انتقال بین جهش و کشش را نشان می دهد و در چنین شرایطی، بستر به طور کامل فشرده شده و ذرات چکیده می شوند.



شکل ۳-۴- سیکل حرکت آب در جیگ

شکل ۳-۵ نیز نمایی از طرز کار یک جیگ را نشان می دهد.



شکل ۳-۵- نمایی از مقطع عرضی یک جیگ

٤-۲- پارامتر های موثر بر عملیات جیگ

٤-۲-۱- سیکل جیگ

همانطور که قبلا اشاره شد اگر در جیگ سطح مشخصی را به عنوان مبنا در نظر بگیریم، آب نسبت به این سطح دارای یک حرکت رو به بالا (جهشی) و یک حرکت رو به پایین(کششی) است. به نظر Bird بخش اصلی جدایش در مرحله حرکت کششی انجام می گیرد ولی به عقیده Mayer حرکت کششی در سقوط ذرات اهمیتی ندارد و فقط اجازه ورود آب مورد نیاز در مرحله بعدی جهش را میسر می سازد. پس می توان گفت به عقیده Bird شتاب اولیه دیفرانسیلی و چکیده شدن ذرات از سقوط با مانع با اهمیت تر است ولی به عقیده

Mayer سیکل جیگ با حرکت جهشی سریع شروع می شود و بار روی سرند را به کلی به سمت بالا می برد و سپس سطح آب برای مدت زمانی ثابت می ماند و پدیده سقوط با مانع در وضعیت ساکن آب اتفاق می افتد.

٤-٢-٢- فرکانس و دامنه نوسان در جیگ

فرکانس و دامنه نوسان در جیگ از جمله پارامترهایی هستند که اثر متقابل بر روی یکدیگر دارند و به طور مستقل بررسی نمی شوند. آزمایش ها نشان می دهد که بازیابی برای هر نرخ بار دهی به شدت حرکت وابسته است. بنابراین میزان انبساط لایه که وابسته به سرعت رو به بالای آب در مرحله اول سیکل بوده و سقوط لایه مواد در مرحله دوم سیکل که به سرعت رو به پایین وابسته است با همین مساله مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای بار اولیه دانه درشت که توزیع دانه بندی محدود و نسبت بیشتری از ذرات کانی سنگین را در بر داشته باشد و یا لایه ضخیمی را تشکیل دهد، دامنه نوسانات باید وسیع و زمان سیکل طولانی باشد. برای تولید کنسانتره ای با درجه خلوص زیاد، بستر باید کاملا فشرده و همچنین حرکت باید سریع و کوتاه باشد ولی برای افزایش بازیابی بستر نباید فشرده بوده و حرکت های طولانی و آرام انجام گیرد.

٤-٢-٣- ضخامت بستر جیگ

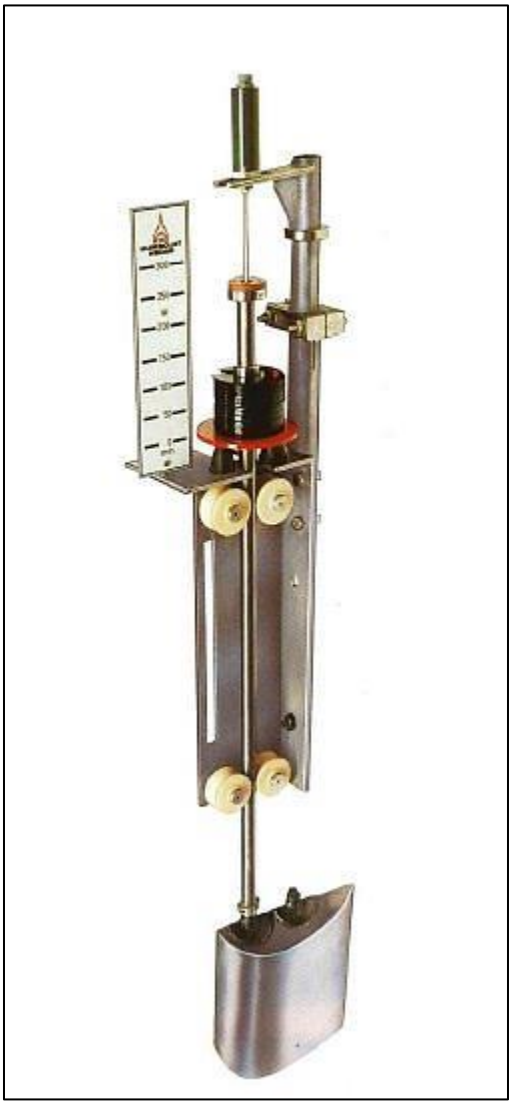
ضخامت بستر که در محدوده ای مشخص با تغییر ارتفاع لبه سرریز باطله قابل تنظیم است باید به شکلی باشد تا قسمت فوقانی لایه کانی سنگین در ارتفاع کمتری نسبت به لبه خروجی سرریز قرار گیرد. ضخامت بستر را می توان به طور موثر با میزان ذرات درشت کانی سنگین در بار اولیه کنترل نمود.

٤-٢-٤- سرند جیگ

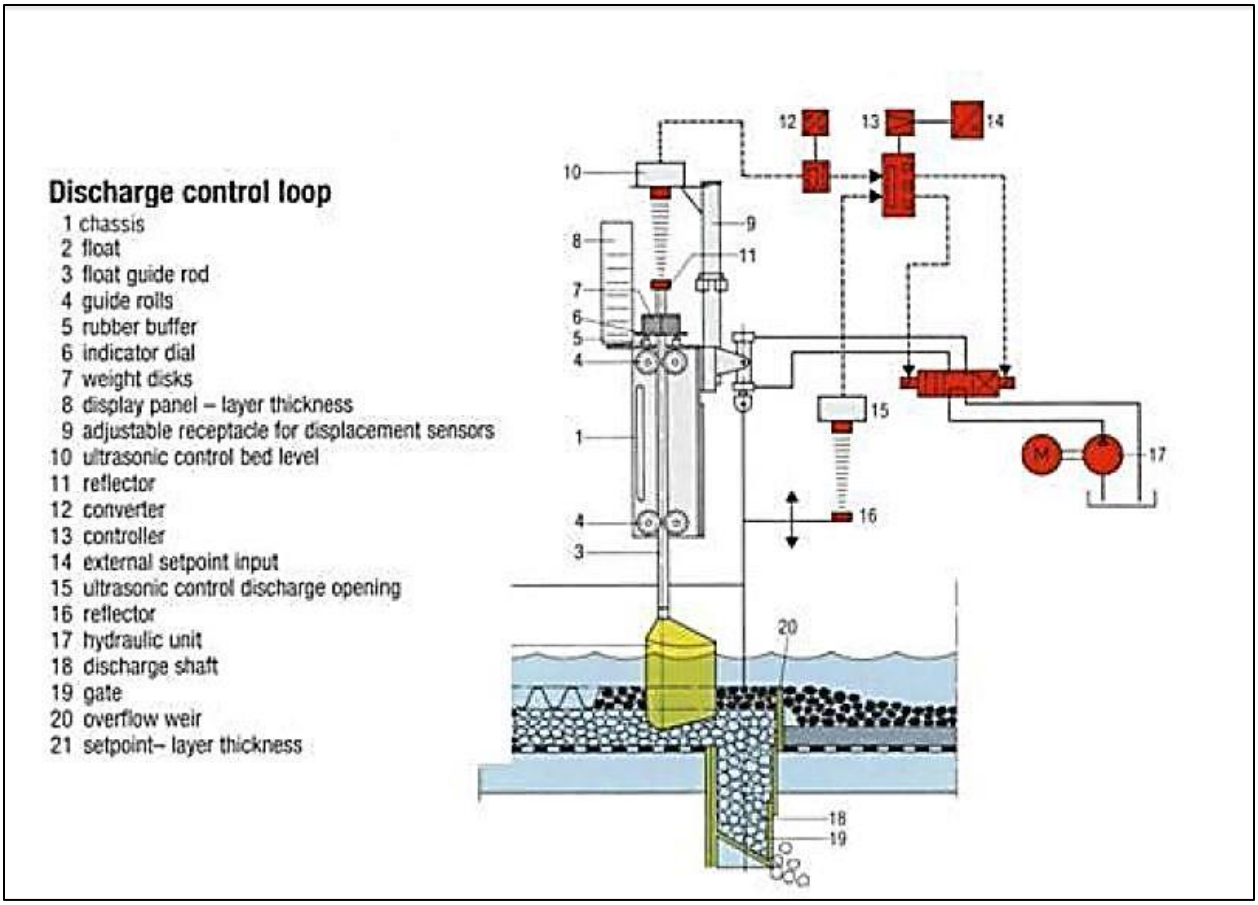
ابعاد چشمه سرند معمولا بر اساس نوع عملیات طراحی می شوند. زمانی که هدف عملیات جمع آوری محصول از سطح سرند باشد، چشمه سرند باید از ریزترین ذرات موجود در بار اولیه نیز کوچکتر باشد و چنانچه هدف جمع آوری محصول از زیر سرند باشد، چشمه سرند باید درشتر از درشترین ذرات موجود در بار اولیه باشد.

٤-٢-٥- مکانیزم کنترل جیگ

یکی از مهمترین پارامتر های موثر بر نحوه عملکرد جیگ، ضخامت مواد روی سرند یا به عبارت دیگر بستر جیگ است. از این رو برای کنترل اتوماتیک جیگ ها از این پارامتر استفاده می شود. برای این منظور شناوری مطابق شکل ۳-۶ داخل این محیط قرار گرفته و با تغییر ضخامت از مقدار بهینه با استفاده از سنسور، سیگنالی به کنترلر ارسال شده و به این طریق با تغییر وضعیت دریچه خروجی و یا ورودی ذرات ضخامت به مقدار اولیه بر می گردد. مدار کنترل یک جیگ در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل۳-۶- شمایی از یک شناور جهت کنترل سطح جیگ



شکل ۳-۷- شمایی از یک مدار کنترل PID جهت کنترل عملکرد جیگ

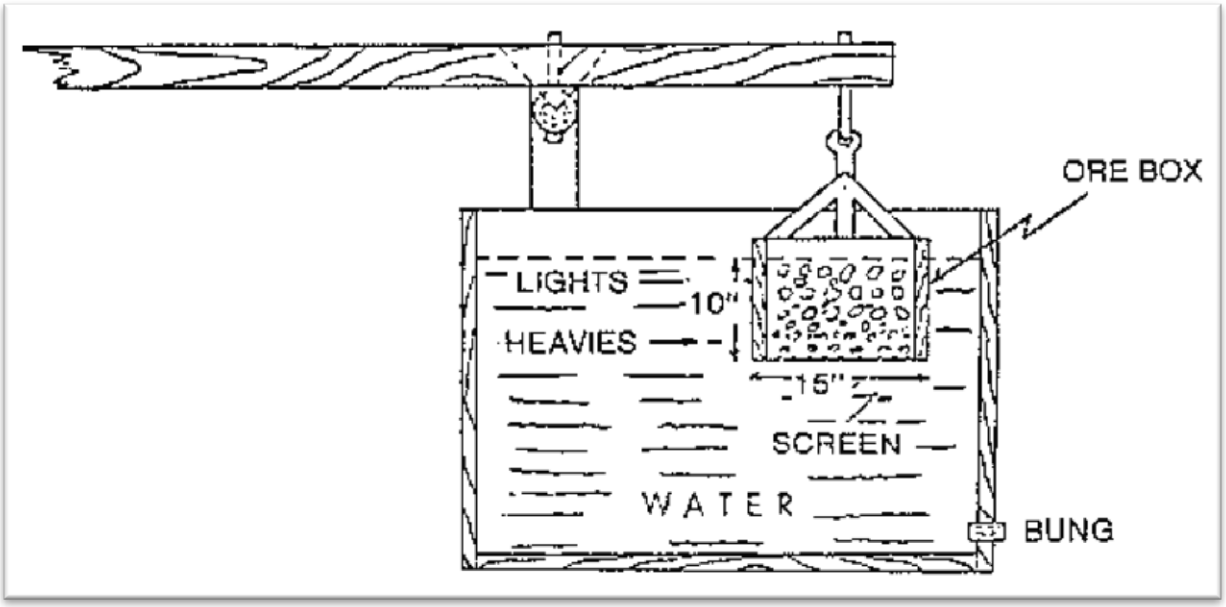
٤-۳- انواع جیگ

به طور کلی جیگ ها را به دو دسته کلی تقسیم بندی می کنند: جیگ هـای دارای سـرند ثابـت و جیـگ هـای دارای سرند متحرک. امروزه از نوع سرند متحرک که قدیمی است به ندرت اسـتفاده مـی شـود و جیـگ هـای هنکوک، جیمز و هالکین از این نوعند. کلیه جیگ های امـروزی و مـدرن از نـوع سـرند ثابتنـد. امـروزه بـرای جداسازی ذرات ریزتر و برای افزایش مومنتوم آن ها از جیگ های سانتریفیوژ نیز استفاده می شـود کـه جیـگ کلسی یکی از انواع آن هاست. در ادامه مشخصات برخی از انواع جیگ ها را مرور می کنیم.

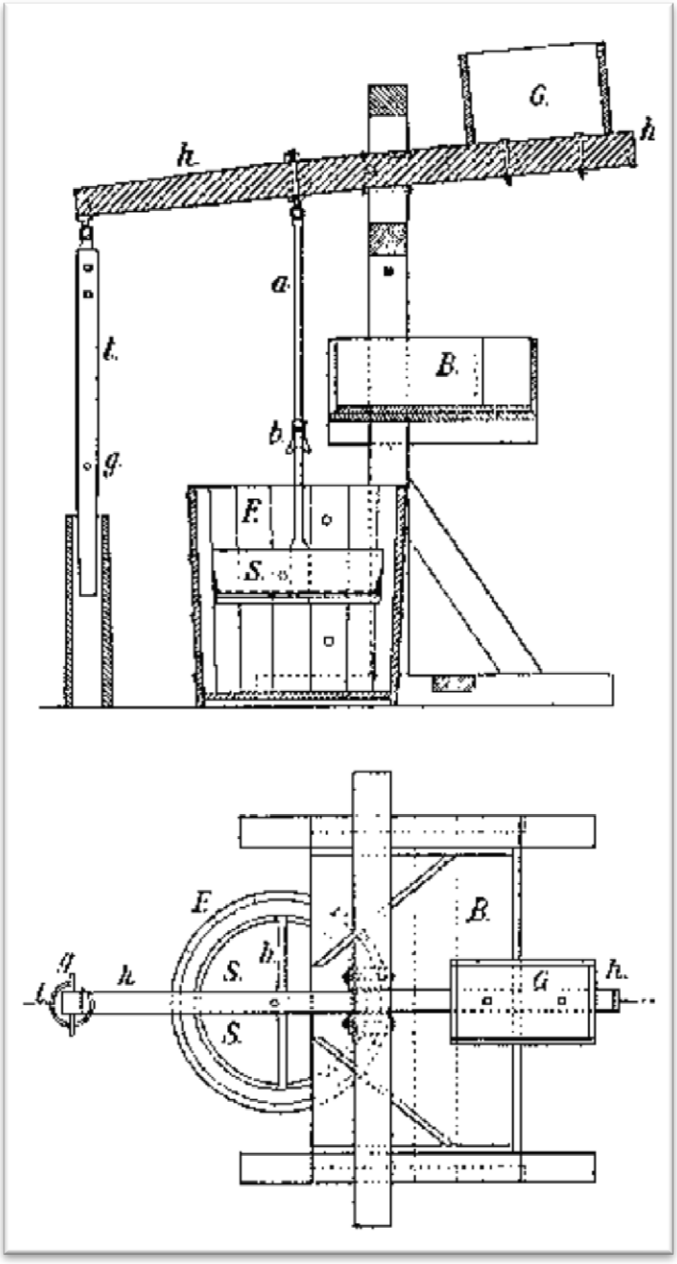
٤-۳-۱- جیگ دستی(Hand Jig)

این وسیله مطابق شکل ۳-۸ و شکل ۳-۹ از یک مخزن یا حوضچه آب تشکیل شـده اسـت کـه در آن ظـرف حاوی ماده معدنی توسط یک اهرم به سمت بالا و پایین حرکت داده می شود. قسمت تحتـانی ظـرف، از یـک

سرند تشکیل شده است. سرند باید به گونه ای باشد که استقامت کافی برای تحمل وزن ماده معـدنی را داشـته باشد. حرکت نوسانی این جیگ به صورت دستی و توسط اهرم ایجاد می شود. با تغییر سرعت حرکت در اهرم می توان دامنه و فرکانس نوسان در سطح جیگ را تغییر داد. مبانی جدایش کانی ها توسط این جیگ بـه خـوبی مشخص و آشکار است.



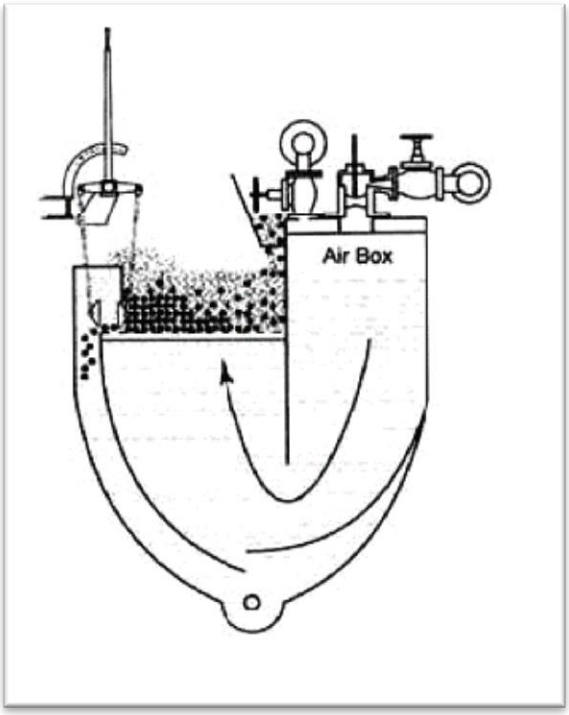
شکل ۳-۸- نوع ساده ای از یک جیگ دستی



شکل ۳-۹- نمایی از یک جیگ دستی

٤-٣-٢- جیگ بوم(Baum Jig)

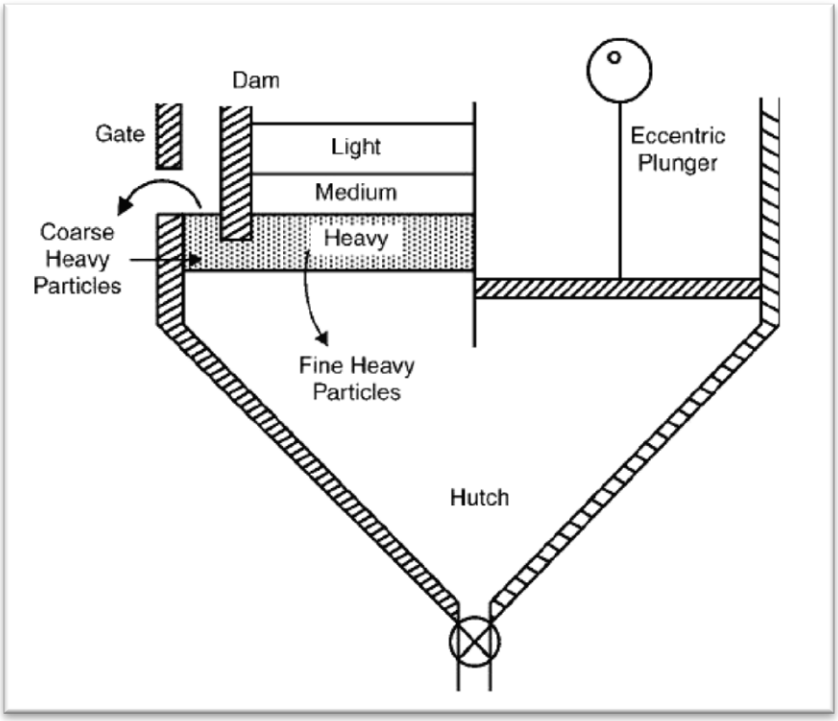
جیگ بوم از وسایلی است که به طور خیلی گسترده در آرایش زغالسنگ مورد استفاده قرار می گیرد. این جیگ (شکل۳-۱۰) دارای مخزنی تقریباً U شکل است. حرکت نوسانی آب با فرکانس معادل ۵۵ تا ۵۷ ضربه در دقیقه ، توسط هوای فشرده، از طریق یک اتاقک هوا ایجاد می شود و در هر سیکل پس از خاتمه حرکات جهشی، دانه ها تحت نیروی ثقل ته نشین می شوند. لازم به ذکر است که در این دستگاه حرکت کششی وجود ندارد و برای این منظور از یک جریان آب رو به بالا استفاده شده است و یا اینکه هوای دمیده شده به آرامی خارج می گردد. ابعاد چشمه های سرند درون جیگ بین 6.35 الی 31.75 میلی متر است و قسمت تحتانی آن را مخزن تشکیل داده است. قسمت تحتانی مخزن جیگ هم مجهز به یک انتقال دهنده مارپیچی است که کار انتقال باطله را به خارج از دستگاه بر عهده دارد. خروج مواد باطله از جیگ نیز به طور نسبی قابل کنترل بوده و چنین وضعیتی، کنترل کننده کیفیت محصول زغال شسته شده در جیگ است. پارامترهایی مانند دانه بندی یکنواخت، میزان باردهی بهینه در سطح جیگ و بسیاری عوامل دیگر در عملیات مؤثرند.



شکل۳-۱۰- نمایی از یک جیگ بوم

٤-٣-٣- جیگ هارتس(Harz Jig)

یکی از قدیمی ترین انواع جیگ با سرند ثابت که هنوز هم مورد استفاده قرار می گیرد، جیگ هارتس است. در این جیگ، حرکت نوسانی آب توسط پیستونی که نیمی از سطح آن را اشغال کرده است تامین می شود. ابعاد بار اولیه کوچکتر از چشمه های سرند است. دانه های سنگین از سرند عبور کرده و به تدریج در قسمت تحتانی جیگ انباشته می شوند. این دانه ها را می توان با باز کردن شیر ته ریز به تناوب، بدون این که تغییری در سطح آب داخل جیگ حاصل شود، تخلیه کرد. در انواع جدید معمولا سطح جیگ هارتس به چهار بخش مجزا که به طور سری قرار گرفته اند تقسیم شده است. بار اولیه به نخستین بخش وارد می شود و شرایط کار جیگ به نحوی تنظیم می شود که محصول بدست آمده در آن دارای کیفیت نهایی مورد نظر باشد. باطله هر بخش به بخش دیگر منتقل می شود. از آخرین بخش، باطله نهایی حاصل می شود و از بخش های میانی نیز محصول میانی می توان گرفت. موادی شبیه سرب و روی، منگنز، فلورین و غیره که در دانه بندی درشت از باطله آزاد می شوند، با این جیگ قابل فرآوری است. شکل ۳-۱۱ نمایی از این نوع جیگ را نشان می دهد.

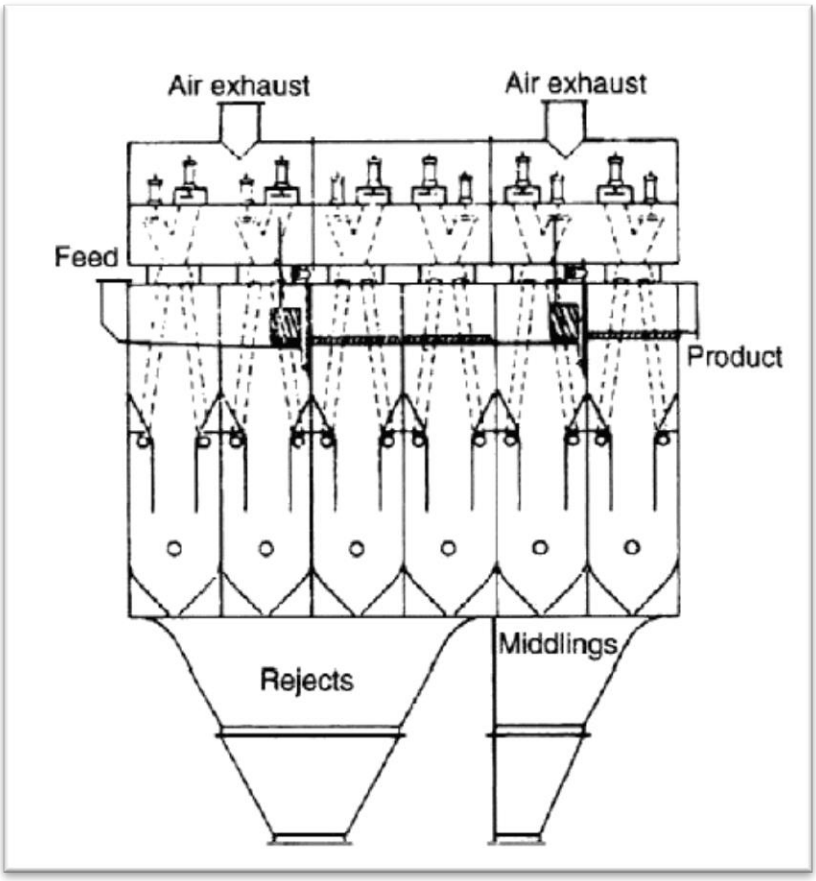


شکل۳-۱۱- نمایی از یک جیگ هارتس

٤-٣-٤- جیگ باتاک(Batac Jig)

این دستگاه نوع پیشرفته جیگ بوم است با این تفاوت که به جای یک محفظه هوا در سرتاسر جیگ ، چند محفظه پیش بینی شده است که این خود موجب توزیع یکنواخت تر هوا درون جیگ خواهد شد. موضوعی که در جیگ بوم (به دلیل اینکه نیرویی که ایجاد لایه بندی در سطح جیگ می کند در یک طرف جیگ قرار دارد) در سطح سرند توزیع غیر یکنواختی را به دنبال دارد و کاهش بازدهی را در پی خواهد داشت اما در جیگ باتاک تنظیم هوا توسط یک سیستم کنترل الکترونیکی صورت می گیرد و بدین ترتیب امکان قطع و وصل سریع جریان هوا وجود دارد. قابلیت تنظیم شیرهای ورودی و خروجی نسبت به فرکانس و دامنه ی حرکت جهشی زیاد است و لذا امکان تنظیم حرکت های کششی و جهشی در حد مورد نیاز وجود دارد، در نتیجه می توان توسط جیگ باتاک زغالسنگ های دانه درشت را به خوبی شستشو داد.

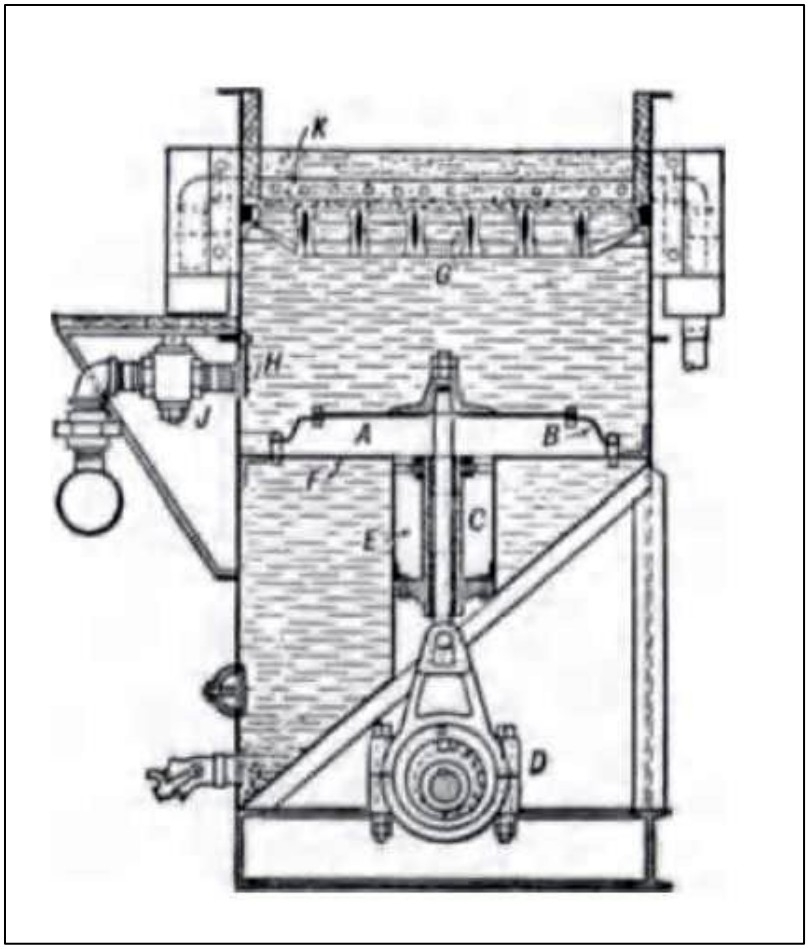
ظرفیت جیگ باتاک برای شستشوی ذرات ریز زغال (0.5 تا 100 میلی متر) 400 و برای ذرات درشت تا 800 تن بر ساعت است. کاهش فضا ، کاهش وزن دستگاه از جمله محسنات این دستگاه به حساب می آید. شکل ۳-۱۲ نمایی از این نوع جیگ را نشان می دهد.



شکل۳-۱۲- نمایی از یک جیگ باتاک

٤-۳-۵- جیگ بندلاری (Bendelari Jig)

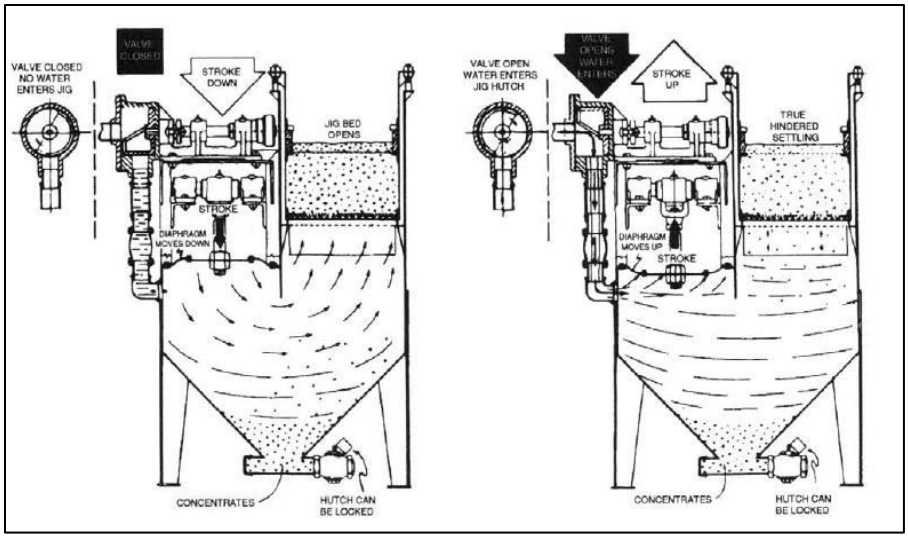
در این جیگ مطابق شکل۳-۱۳ حرکت نوسانی آب توسط دیافراگمی تامین می شودکه در زیر سرند جیگ قرار گرفته است و تمام سطح مقطع جیگ را می پوشاند. این جیگ با پاره ای تغییرات به طور گسترده برای آرایش رسوبات آبرفتی و بازیابی کانی های سنگین از آن ها مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۳-۱۳- نمایی از یک جیگ بندلاری

٤-۳-٦- جیگ دنور (Denver Jig)

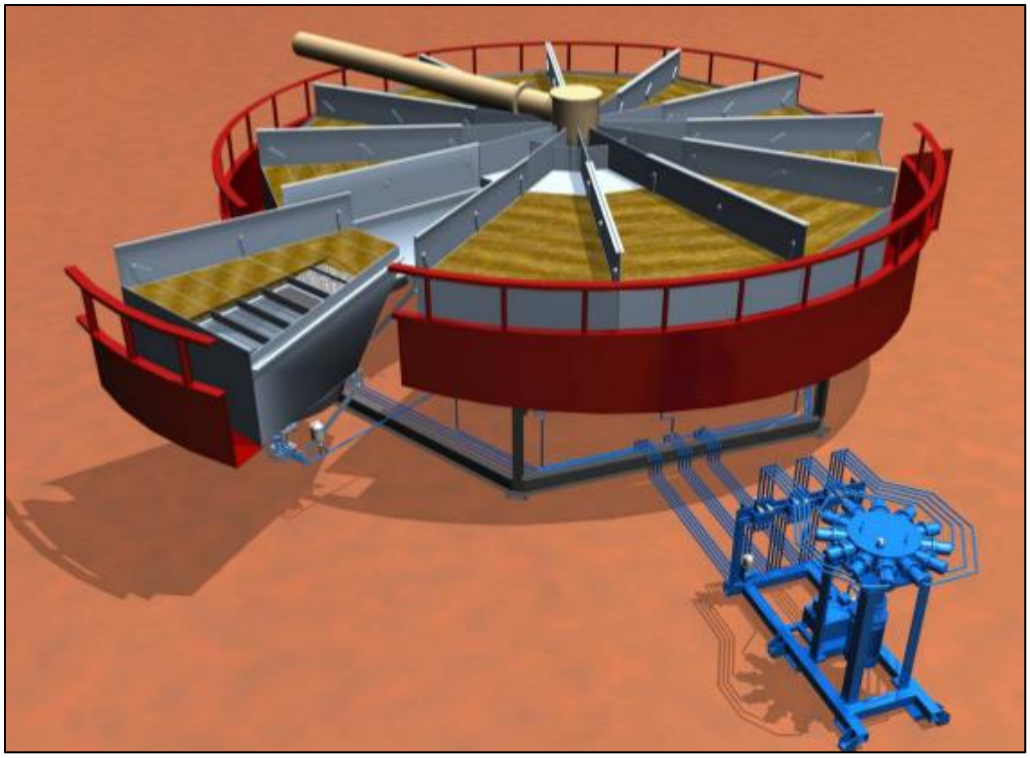
جیگ دنور از وسائلی است که قادر است در دامنه وسیعی از دانه بندی کار کند. حرکت نوسانی در این جیگ توسط یک دیافراگم ایجاد می شود (شکل ۳-۱۴). این جیگ مجهز به یک شیر دوار است و می توان آن را به نحوی تنظیم کرد که در هر مرحله ای که مورد نظر باشد، باز شود. به این ترتیب می توان آن را همزمان با حرکت کششی و یا بالعکس همزمان با حرکت جهشی تنظیم کرد. به عبارت دیگر باتغییر زمان باز شدن شیر، می توان شرایط کار جیگ را از حالتی که حرکت کششی به طور کامل حذف شده است، تا حالتی که حرکت کششی و حرکت جهشی کاملا یکسان هستند، تغییر داد. به این ترتیب محدوده کاربرد جیگ افزایش یافته و در هر مورد می توان توسط این جیگ جدایشی با دقت زیاد انجام داد.



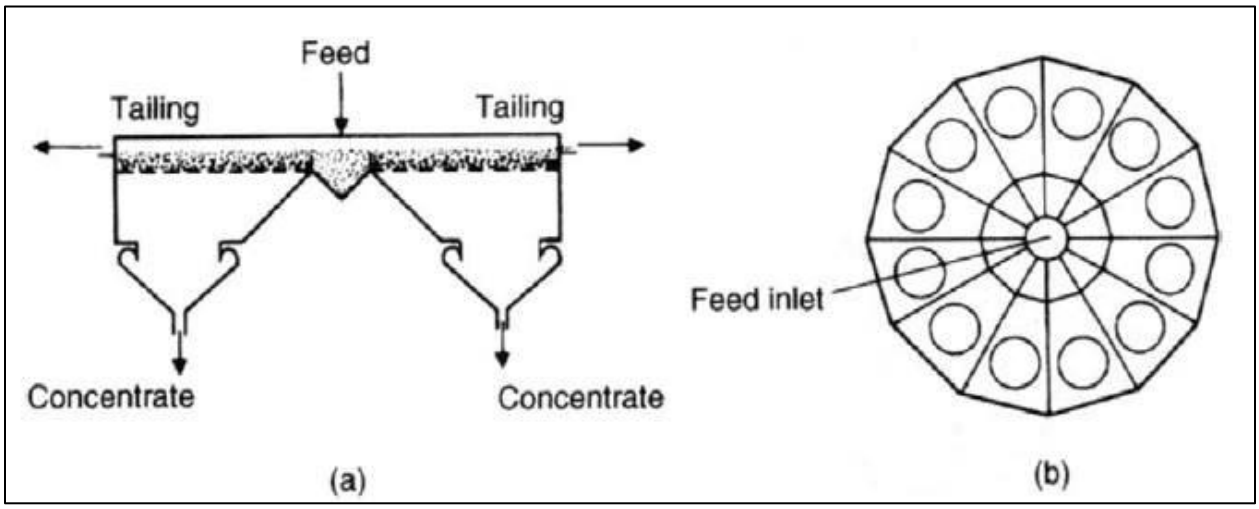
شکل ۳-۱۴- نمایی از جیگ دنور

٤-۳-۷- جیگ IHC (محوری)

بدنه بسیاری از جیگ ها مربعی یا مستطیل شکل است و معمولا ترکیبی از یک، دو و یا چند سلول که به طور سری قرار گرفته اند، تشکیل می شوند. این جیگ ها به گونه ای ساخته شده اند که در آن ها بتوان سرعت جریان را در سطح جیگ افزایش داد (با افزایش آب از طریق مخزن جیگ). با توجه به شکل های ۳-۱۵ و ۳-۱۶ ، بار اولیه در مرکز جیگ وارد شده و به طور محیطی به سمت تخلیه باطله که در اطراف جیگ پیش بینی شده است هدایت می شود. این دستگاه برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ در مالزی و تایلند ساخته شد و در شستشوی بسیاری از مواد معدنی از جمله الماس، طلا و بعضی از کانسنگ های آهن، برای ظرفیت های بسیار زیاد مورد استفاده قرار می گیرد. بزرگترین نوع این جیگ 7.5 متر قطر دارد و قادر است تا ۳۰۰ متر مکعب بر ساعت بار را با حداکثر ابعاد ۲۵ میلی متر شستشو دهد. به منظور جلوگیری از تلفات ذرات ریز کانی، حرکت هارمونیکی که توسط خارج از مرکز ایجاد می شود به وسیله حرکت نامتقارن دنده اره ای دیافراگم تعویض می گردد و حرکتی سریع به طرف بالا و آرام به طرف پایین دارد. این نوع جیگ برای شستشوی ذرات تا حد ۶۰ میکرون نیز استفاده می گردد.



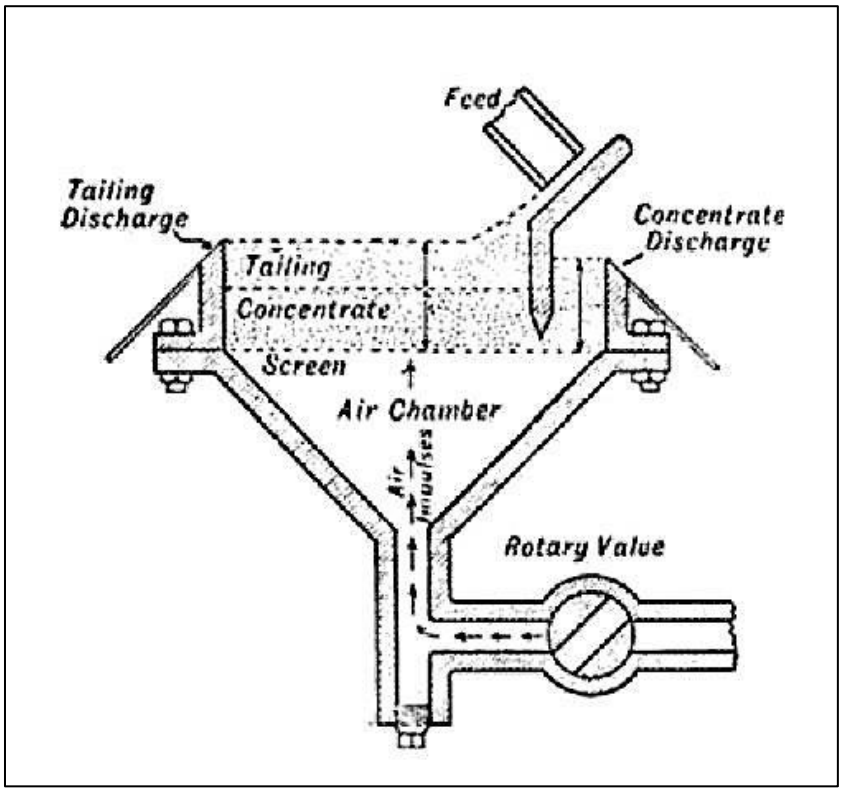
شکل ۳-۱۵- نمایی از یک جیگ IHC



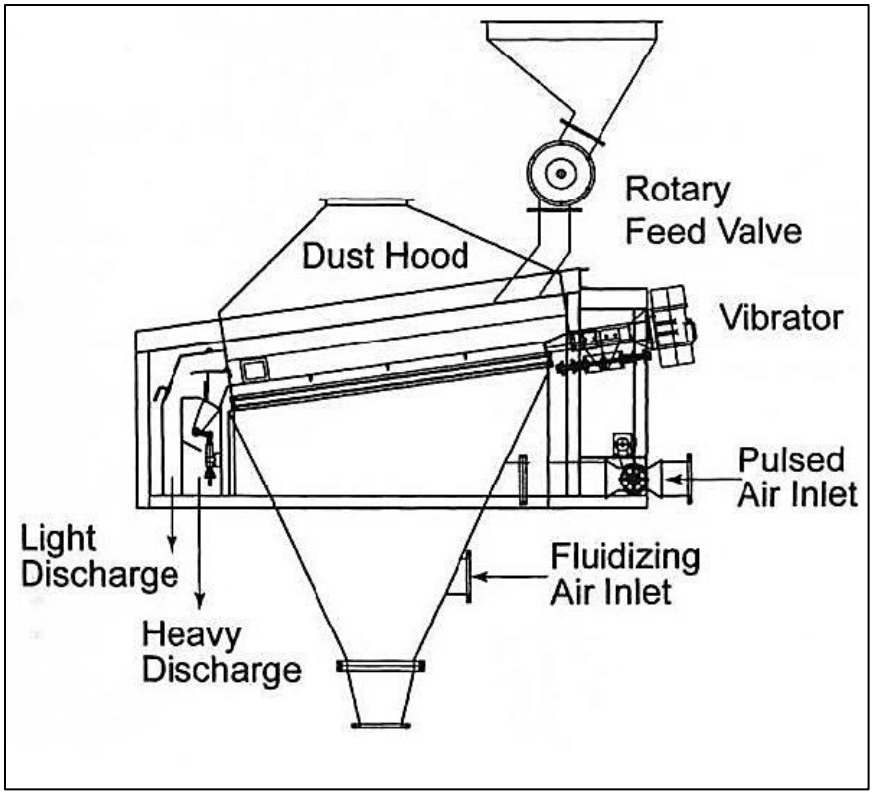
شکل ۳-۱۶- سطح مقطع و نمای بالایی از یک جیگ محوری IHC

٤-٣-٨- جیگ هوایی

یکی دیگر از انواع جیگ ها، جیگ هوایی است. اصول کار این جیگ شبیه به جیگ هـای آبـی اسـت، بـا ایـن تفاوت که سیال مورد استفاده در آن هوا است. هوا از قسمت تحتانی جیگ بـه تنـاوب توسـط شـیر دواری بـه درون جیگ دمیده می شود و از زیر سرند در لایه مواد نفوذ می کند. بدین ترتیب مـواد بـر روی سـرند تحـت تأثیر حرکت نوسانی بوجود آمده، بر مبنای چگالی طبقه بندی شده، از محل های مربوطه تخلیه مـی گردنـد. از این جیگ عمدتاً در مناطق کویری و کم آب استفاده می شود. ظرفیت این جیگ ها ۵ تن در هر ساعت به ازای هر متر مربع از سطح بستر است. قبلاً از این وسیله برای پر عیار سازی سولفورها استفاده می شـد ولـی امـروزه برای آرایش زغالسنگ با دانه بندی محدود بکار می رود و حذف نرمه در بار ورودی به دستگاه از جمله مسائل مهم آن است. شکل های ۳-۱۷ و ۳-۱۸ این نوع جیگ را نشان می دهند.



شکل ۳-۱۷- نمایی از یک جیگ هوایی

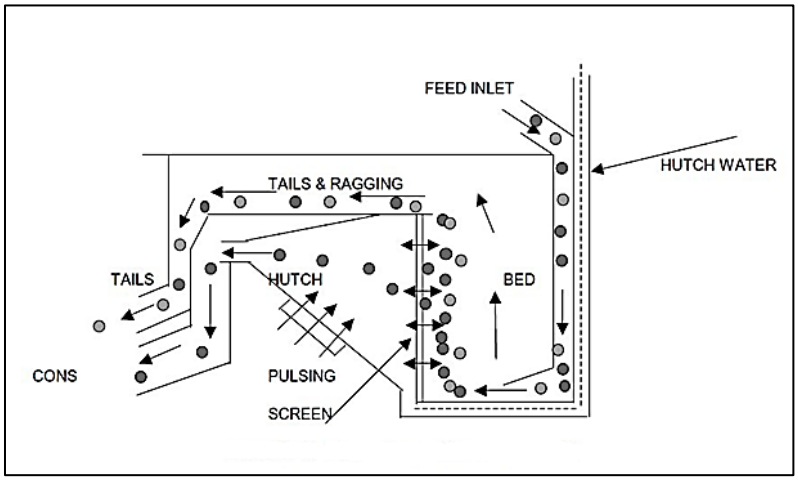


شکل ۳-۱۸- نمونه ای دیگر از جیگ هوایی

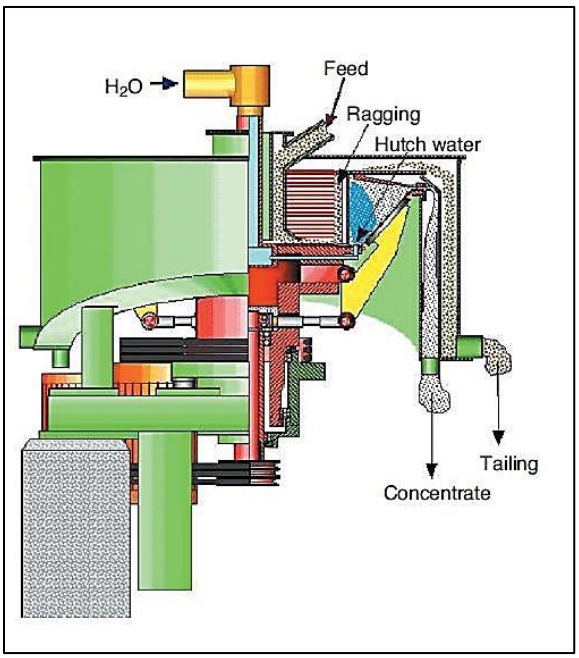
٤-۳-۹- جیگ های گریز از مرکز کلسی (Kelsey Jigs)

جیگ های کلسی در بیست سال اخیر توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته اند و نمونه ای از جیگ هایی هستند که از نیروی گریز از مرکز استفاده می کنند. اصول اساسی حاکم بر جیگ های گریز از مرکز کلسی همانند جیگ های معمولی است. یعنی بستر با حرکات پالسی به حرکت در آمده و از جابجایی ایجاد شده جهت جداسازی استفاده می شود با این تفاوت که شتاب گرانشی تقویت شده توسط نیروی گریز از مرکز سبب می شود که حساسیت جداسازی بیشتر شده و ذرات ریزتر و با اختلاف دانسیته کمتر نیز بتوانند جدا شوند. بازیابی ذرات ریز در این دستگاه ها به دلیل غلبه بر اثرات سطحی و ویسکوزیته که در دستگاه های جداکننده گرانشی معمولی، عامل محدود کننده می باشد، بهبود یافته است. در مقایسه با جیگ های معمولی، در جیگ های کلسی، سرند داخلی دستگاه و مواد پشت سرند به صورت عمودی واقع شده اند. پالپ خوراک از بالا به درون کاسه دستگاه وارد می شود. نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش کاسه دستگاه باعث پراکندگی ذرات پشت سرند می شود. ضربات پالسی توسط یک دیافراگم، همزمان با چرخش کاسه دستگاه روی مواد اعمال

می شود. طی فرآیند طبقه بندی شدن ذرات، مواد سنگین تر راه خود را در میان دوغاب بـه سـمت پـایین لایـه مایع پیدا کرده و ذرات سبک تر به سمت بالای آن حرکت کرده و وارد باطله می شوند. شکل های ۳-۱۹ و ۳-۲۰ این نوع جیگ را نشان می دهند.



شکل۳-۱۹- نمایی از مکانیزم جیگ های گریز از مرکز کلسی



شکل ۳-۲۰- نمایی دیگر از جیگ کلسی

عوامل موثر بر کارکرد این دستگاه عبارتند از:

سرعت چرخش:

با افزایش سرعت چرخش، بستر فشرده تر شده شتاب گرانشی حاصل از گریز از مرکز بیشتر شده و در نتیجه عیار کنسانتره بالاتر میرود و در عین حال وزن کنسانتره تولیدی کمتر می شود.

اثرات پارامترهایی همانند فرکانس پالس وارد شده، دبی آب مورد استفاده، طول ضربه، نوع و سایز مواد درشت، کاملا مشابه با جیگ های معمولی است.

مزایای این دستگاه عبارتند از:

۱- توانایی در جداسازی ذرات ریز تر (بطور معمول ذراتی تا ۳۸ میکرون) و نیز توانایی جداسازی ذراتی که اختلاف دانسیته کمتری دارند (به عنوان مثال زیرکون با دانسیته 4.4 g/cm3 و کیانیت با دانسیته 3.2 g/cm3)

۲- داشتن ظرفیت مناسب (بویژه مدل های جدید و بزرگتر) برای ابعاد ذرات خوراک ورودی

معایب این دستگاه عبارتند از:

۱- ساختار مکانیکی پیچیده ای دارند.

۲- نیاز به مراقبت روزانه و روغن کاری روزانه داشته و بایستی تعمیرات دوره ای برای آن ها در نظر گرفت.

۳- نیاز به سرند کردن خوراک ورودی تا حد کوچکتر از ابعاد سرند داخلی دستگاه وجود دارد تا روزنه های سرند درونی دچار گرفتگی نشوند. همچنین برای جداسازی ذرات درشت، باطله خروجی بایستی مجددا سرند شود.

۴- سرند داخلی دستگاه نیاز به تمیزکاری روزانه دارد، اگر چه در دستگاه های جدید این کار به صورت اتوماتیک صورت می پذیرد.

۵- با توجه به این که این دستگاه نیاز به فونداسیون جامد مستحکم و سیستم های غربالگری فرعی همراه دارد، لذا سرمایه اولیه و سرمایه در گردش بالایی نیاز دارد.

۵- جداسازی بوسیله جریان لایه نازک آب

یکی از قدیمی ترین روش های ثقلی پر عیار سازی بوسیله لاوک است که برای جدایش گل و لای و مواد سبک و شستشوی ماسه های طلا دار به کار می رود. ولی آگریکولا در سال ۱۵۴۶ استفاده از ناو مشبک را ارائه کرد و در سال ۱۶۰۲ کریو جدایش کاسیتریت بر اساس جریان های لایه ای را نشان داد. شکل ۳-۲۱ تصویری از یک ناو شستشو همراه با عملیات جیگ دستی برای یافتن طلا را در قرون وسطی نشان می دهد.

شکل ۳-۲۱- نقاشی حکاکی شده مربوط به قرون وسطی که ناو شستشوی آگریکولا و جیگ دستی طلا را نشان می دهد

اگر چه ناوهای شستشو و وسایل مشابه از ساده ترین انواع جریان های لایه ای هستند و از دیر باز شناخته شده اند ولی امروزه نیز به دلیل هزینه های سرمایه گذاری پایین و امکان تهیه کنسانتره های تجمعی از رسوبات

آبرفتی و ماسه های ساحلی از آن ها استفاده می شود. استفاده از لاوک های محدب برای شستشوی مواد شنی در سال ۱۸۴۸ رواج یافت و ده سال بعد نوع مقعر آن ها به کار گرفته شد.

در این روش، جدایش ذرات در لایه نازکی از آب که بر روی سطح شیب داری در حرکت است، انجام می شود. در این شرایط حرکت دانه های جامد به ابعاد، چگالی و شکل آن ها بستگی دارد. صفحه شیب دار می تواند صاف، ناهموار یا دارای موانعی بوده، شیب آن کم یا زیاد، شکل آن مسطح، محدب ، مقعر یا پیچیده تر و سرانجام ساکن یا متحرک باشد. جریان آب می تواند پیوسته و یا غیر پیوسته، آرام و یا متلاطم به علاوه ممکن است حرکتی در جهت قائم یا دورانی به آن افزوده شود.

پارامترهای عمده ای که در جریان لایه های نازک بر روی سطح شیبدار دخالت دارند، عبارتند از:

شیب بستر

ناهمواری بستر

ضخامت لایه ای آب

نسبت بین بیشترین و کمترین ته نشینی دانه های جامد

رقت پالپ ورودی

پارامترهای دیگری که به نوع ماده معدنی بستگی دارند و قابل کنترل مستقیم نیستند، عبارتند از:

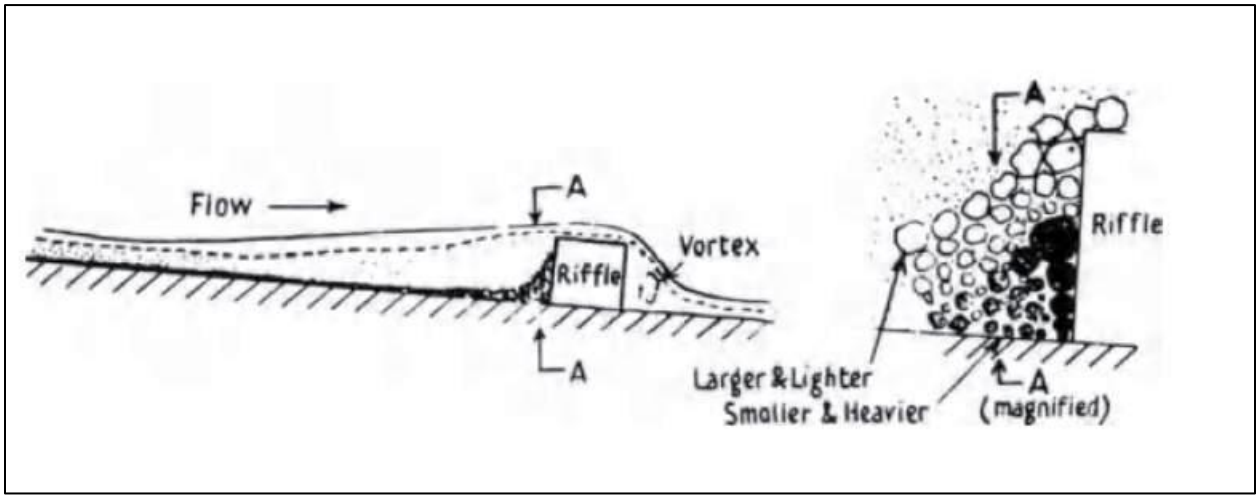
- نسبت چگالی دانه های سنگین و سبک

- شکل دانه ها

- میزان پیچیدگی ترکیب کانی ها بر روی بستر

در روش جدایش مواد در جریان های لایه ای به عنوان بستر به ندرت از سطوح صاف و صیقلی استفاده شده است و معمولا به نحوی اصطکاک بستر را افزایش می دهند و یا با نصب تیغه هایی در برابر حرکت آب،

موانعی در برابر جریان و دانه های جامد ایجاد می کنند. در نتیجه این موانع، در سطوح تحتانی لایه آب، ایجاد جریان های متلاطم و یا گردابی می شود و لایه های فوقانی با لغزیدن و یا غلتیدن یا پرش از روی آن ها عبور می کنند. چنانچه سطح بستر ناهموار باشد با ایجاد اصطکاک بیشتر، دانه ها در بخش تحتانی لایه تمایل به متوقف شدن دارد. دانه ها پس از توقف، خود، نقش بستری ناهموار را ایفا می کنند که لایه های فوقانی از روی آن ها حرکت می کنند. به این ترتیب با ناهموار کردن بستر می توان فشار دینامیکی جریان را افزایش داد. این روش در بیشتر حالات بهترین نتیجه را با صرف کمترین میزان مصرف آب داده است. چنانچه این ناهمواری ها تبدیل به تیغه هایی در مقابل جریان آب شود، تاثیر آن به مراتب بیشتر است. در شکل ۳-۲۲ تاثیر نصب یک تیغه بر روی سطح شیبدار در مقابل جریان لایه نازک آب نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۲- تاثیر نصب تیغه در برابر جریان لایه نازک آب

در ادامه برخی از دستگاه های رایج در صنعت که از جریان لایه نازک آب برای آرایش مواد معدنی استفاده می کنند، مورد بررسی قرار می گیرد.

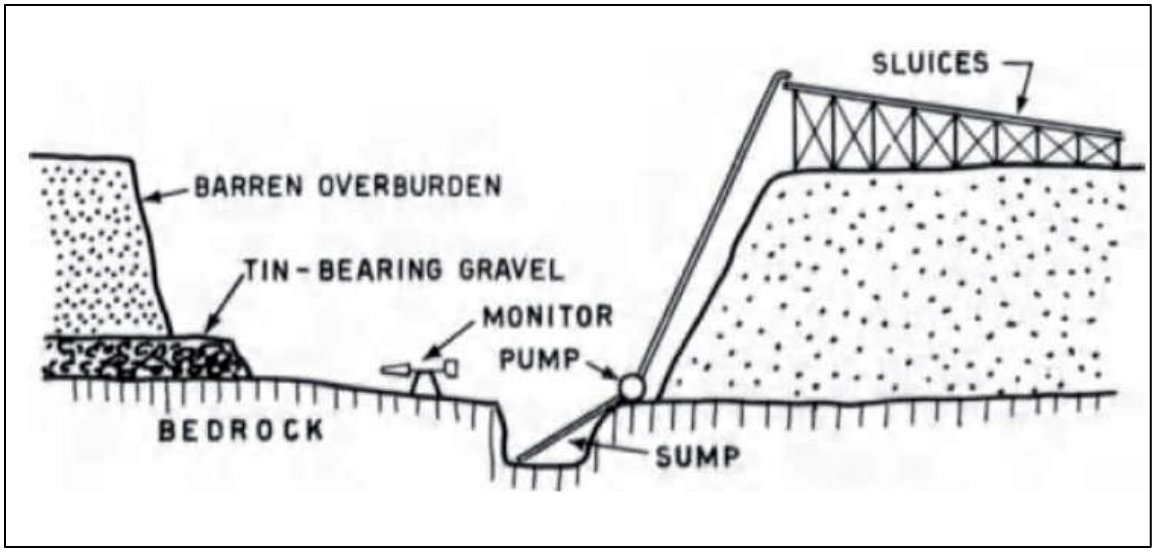
۵-۱- شستشوی ساده

ساده ترین روش شستشو را می توان در نواحی مینرالیزه بعد از باران های سنگین به طور طبیعی مشاهده کرد. آب های سطحی در مسیر خود ماسه های سبک را حمل می کنند و کانی های سنگین در محل خود باقی می مانند. روش پیشرفته تر آن، که در مورد بعضی معادن نزدیک به ساحل دریا به کار گرفته شده است، استفاده از

جزر و مد دریا است. در این روش ماده معدنی در بخشی از ساحل که دارای شیب مناسب باشد، ریخته می شود. دانه های سبک تحت تاثیر امواج به تدریج شسته شده، به داخل دریا منتقل می شوند و دانه های سنگین برجا می مانند. در طی زمان جزر که آب دریا پایین می رود، می توان کانی های سنگین پرعیار شده را جمع آوری کرد و مجددا ماده معدنی اولیه را در ساحل قرار داد. به این ترتیب بخشی از عملیات شستشو توسط طبیعت انجام می شود. به علاوه گاهی در طبیعت موانعی به موازات امواج نصب می شود. در نتیجه جزر و مد، دانه های سبک تشکیل دهنده ماسه این موانع را طی می کنند و به دریا وارد می شوند. حال آن که کانی های سنگین پشت موانع باقی می مانند.

چنانچه در منطقه ای آب کافی وجود داشته باشد، سایر شرایط طبیعی نیز مناسب باشد، با استفاده از لایه های نازک آب می توان کانی های سنگین را به طور ارزان قیمت آرایش داد. برای این منظور می توان با انحراف آب رودخانه و گذراندن آن از روی کانسار ناخالصی های موجود در سنگ معدنی را همراه با واریزه های موجود بر روی کانسار توسط آب حمل کرد و با تکرار این عمل به محصول پر عیار شده ای دست یافت. اشکال این روش، از بین رفتن خاک منطقه برای کشاورزی و انسداد سیستم آبکشی طبیعی است. لذا ممکن است در مناطق پیشرفته از نظر کشاورزی یا صنعتی قابل اجرا نباشد.

در صورتی که دسترسی به آب تحت فشار (یا ارتفاع) باشد و مشکلات دیگری وجود نداشته باشد، می توان با استفاده از فشار آب، ماده معدنی را استخراج کرد و با جریان دادن آن بر روی بستری با شیب مناسب، گانگ آن را توسط آب به خارج حمل کرد و به این ترتیب کانی های سنگین را آرایش داد. نمونه ای از این روش که درمعادن قلع مالزی مورد استفاده قرار می گیرد در شکل های ۳-۲۳ و ۳-۲۴ نشان داده شده است.

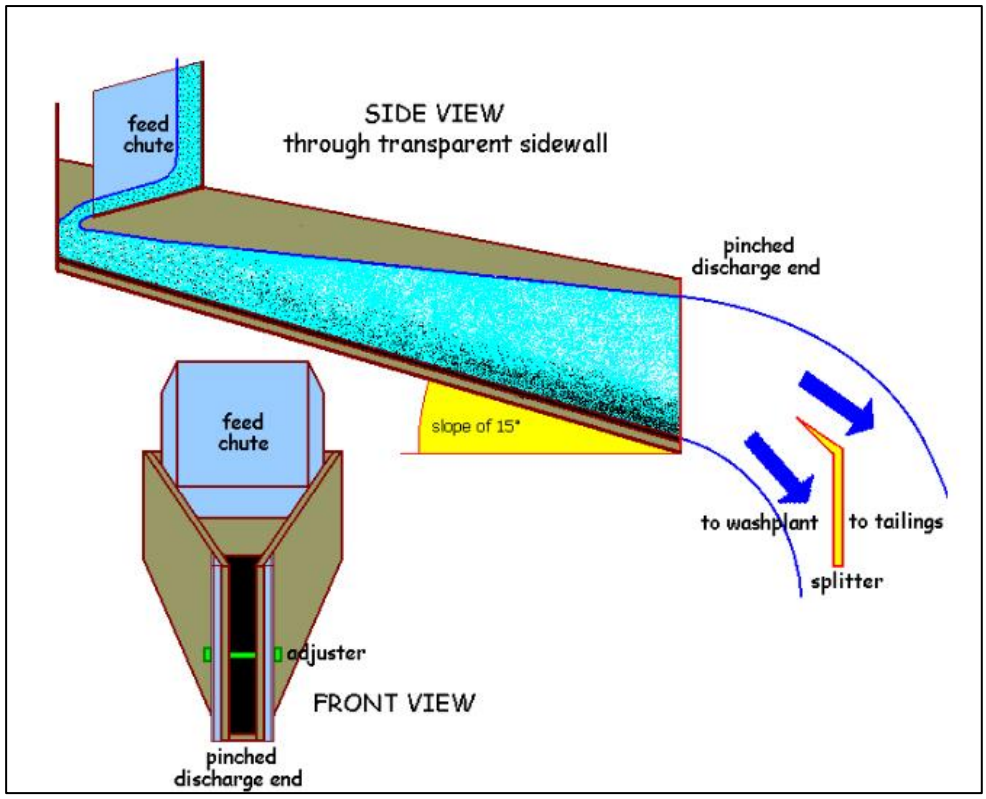


شکل ۳-۲۳- روش استخراج و آرایش قلع در مالزی

شکل ۳-۲۴- استفاده از فشار آب برای آرایش کانی های حاوی قلع در مالزی

۵-۲- ناو شستشو(Pinched Sluice)

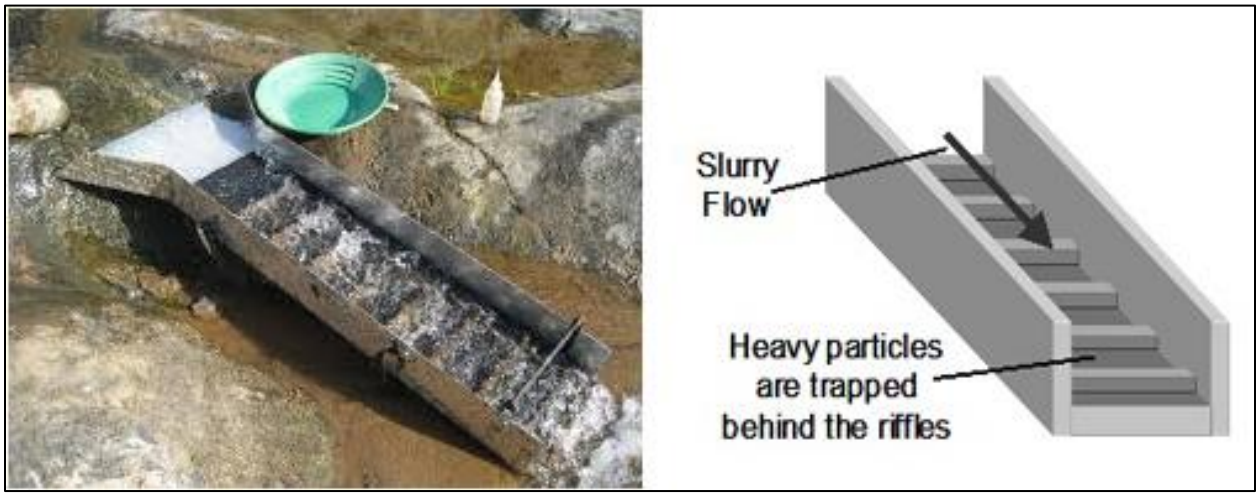
این وسیله ساده مطابق شکل ۳-۲۵ از یک ناو شیبدار تشکیل شده است که عرض آن از بالا به پایین به تدریج کم می شود. طول آن حدود یک متر و عرض آن در قسمت ورود بار اولیه حدود ۲۰۰ میلی متر و در قسمت خروجی حدود ۲۵ میلی متر است. شیب ناو حدود ۱۶ تا ۲۰ درجه است. بار اولیه به صورت پالپی با غلظت ۵۰ تا ۶۵٪ جامد به طور آرام بر روی آن ریخته می شود. دانه های جامد در حین حرکت بر روی سطح شیبدار طبقه بندی می شوند و همانطور که مشاهده شد، دانه های کوچک تر و سنگین تر بر روی سطح بستر با سرعتی کندتر و دانه های بزرگتر و سبک تر در قسمت های بالاتر و با سرعتی بیشتر طول ناو را طی می کنند. با کم شدن تدریجی عرض ناو، ضخامت لایه مواد در داخل آن به تدریج بیشتر می شود. در محل خروج، دانه های کوچکتر و سنگین تر مسیری نزدیک به خط قائم را می پیمایند، حال آن که دانه های بزرگ تر و سبک تر که دارای سرعتی بیشتر هستند، تا مسافتی به جلو پرت می شوند. لذا با نصب دریچه هایی قابل تنظیم می توان محصولات مختلف را از هم جدا کرد.



شکل ۳-۲۵- نمایی از یک ناو شستشو

۵-۳- جعبه شستشو (Sluice box)

طرز کار جعبه شستشو همانند ناو شستشو است با این تفاوت که خوراک پس از سرند شدن از بالا روی جعبه که با شیب کمی روی زمین قرا رگرفته ریخته می شود. رسوبات چگالتر و سنگین در پشت موانع تیغه ای به ترتیب وزن مخصوص قرار میگیرند و کانی ها سبک توسط جریان آب از جعبه خارج می شود (شکل ۳-۲۶)



شکل ۳-۲۶- نمایی از جعبه شستشو

۵-٤- میز لرزان آبی

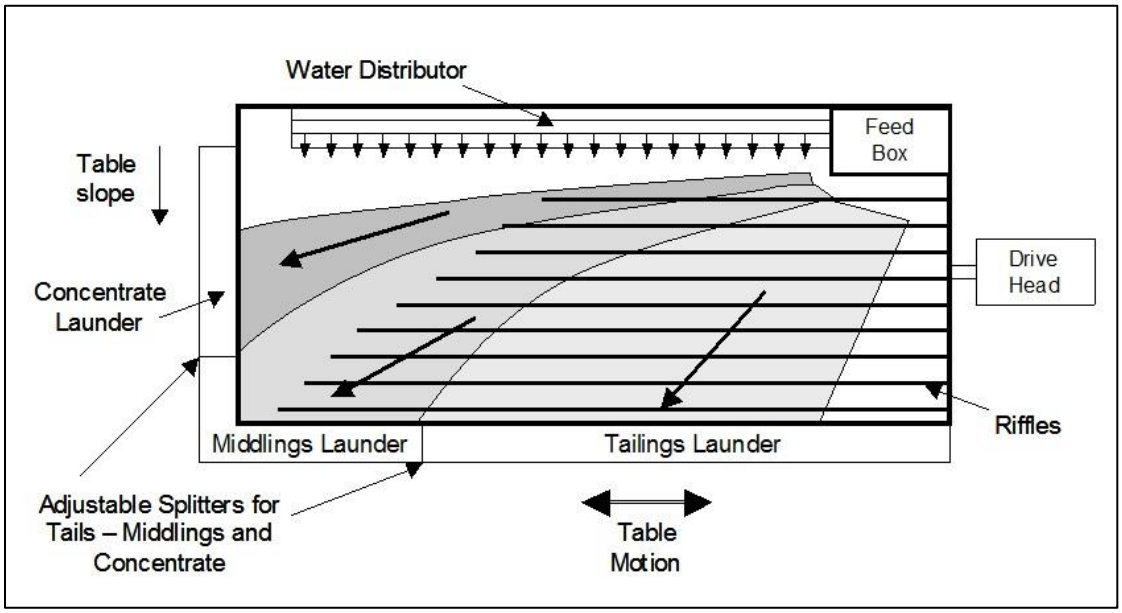
در میان وسایل آرایش ثقلی، احتمالا میز لرزان موثرترین آن هاست. از این دستگاه برای آرایش مواد دانه ریز و گاهی آرایش نهایی موادی که به وسیله سایر روش های ثقلی پر عیار شده اند، استفاده می گردد (شکل ۳-۲۷)

میز لرزان از سطحی مستطیل شکل که در جهت عرض، شیبی جزئی دارد، تشکیل شده است. سطح میز لرزان توسط موانعی که معمولا در امتداد طول هستند، پوشیده شده است. ارتفاع این موانع از سمت ورود بار اولیه به طرف دیگر به تدریج کم شده به نحوی که بخشی از میز در انتهای آن صاف و بدون مانع است.

بار اولیه با غلظتی در حدود ۲۵ درصد وزنی جامد بر روی ابتدا و بالای میز ریخته می شود و در قسمت های بعدی میز آب شستشو از بالا به آن اضافه می گردد. توسط مکانیزمی حرکت نوسانی در جهت طول میز به آن وارد می شود، این مکانیزم به گونه ایست که میز را به آرامی جلو می برد و به سرعت به عقب برمی گرداند.

شکل ۳-۲۷- نمایی از یک میز لرزان

درنتیجه ذرات جامد بر روی سطح در امتداد طول آن به جلو پرتاب می شوند. این عمل باعث می شود که ذرات سنگین تر در امتداد طول حرکت کرده و به قسمت جمع کننده محصول پرعیار بروند و مواد سبک تر عرض میز را طی کرده و در قسمت باطله ریخته می شوند (شکل ۳-۲۸)



شکل ۳-۲۸- نحوه حرکت ذرات روی میز لرزان

میز لرزان از دستگاه های ساده و بدون حرکت یا با حرکت لرزشی که در آن ها آب جریان افقی دارد، تشکیل شده است. این دستگاه ها عموما شامل سطح شیبداری می باشند که ذرات همراه با آب در روی آن جریان یافته، ذرات سنگین و سبک از یکدیگر جدا می شوند. بدین ترتیب که ذرات در ابتدا به صورت معلق بوده، پس از ته نشین شدن، در اثر جریان آب به حرکت در می آیند. عمل راندن توسط آب به چندین روش انجام میشود:

۱- ذرات در اثر جریان در روی سطح شیبدار غلتیده جلو میروند.

۲- ذرات به صورت معلق در آب درآمده، همراه آن حرکت میکنند.

۳- ذرات در روی سطح شیبدار در اثر جریان آب لغزیده جلو میروند.

کاربرد میز لرزان در فرآوری محصولات معدنی از جمله طلای معدنی، باریت، منگنز، کرومیت و مس می باشد و همچنین برای غنی سازی ماده های آسیاب شده قلع، تنگستن، نیوبیم و تانتالیوم مورد استفاده قرار می گیرد.

در کارآیی میز پارامترهای متعددی مؤثرند. از آن جمله می توان به پارامترهای مربوط به دستگاه (مانند فرکانس و دامنه نوسانات، شیب عرضی و طول میز، شکل موانع و سطح میز) و پارامترهای مربوط به بار ورودی (مانند محدوده ابعاد دانه بندی، ظرفیت بار ورودی، انتخاب دقیق نقاط جدایش، شدت جریان بار ورودی، جرم مخصوص پالپ و میزان شستشو) اشاره کرد. دامنه نوسان های میز بر روی بازدهی آن تأثیر دارد. هر چه بار ورودی به میز دانه ریز تر باشد، باید فرکانس را بیشتر و دامنه را کوتاه تر کرد و در حالت بار ورودی دانه درشت بر عکس این خواهد بود. ذرات ریز به محض تماس با میز نسبت به ذرات درشت، بیشتر به سطح میز می چسبند و در نتیجه هر چه دامنه نوسان کوتاه تر انتخاب شود، امکان وقوع چنین حالتی کمتر است. همچنین در عملیات رافر (پرعیار سازی اولیه) از دامنه های طولانی و در مراحل کلی تر از دامنه های کوتاه استفاده می شود. در بیشتر حالات خط جدایش ذرات سنگین و سبک بر روی میز به خوبی قابل رویت است و لذا تنظیم آن هم به سادگی انجام می پذیرد. شیب میز نقش مهمی را در انتقال عرضی و طولی مواد بر عهده دارد.

شیب عرضی زیاد موجب انتقال مواد بدون طبقه بندی به بخش ذرات سبک خواهد شد.

چنانچه مواد سبک از بخش مربوط به ذرات سنگین خارج شوند، ارتفاع و یا شیب عرضی را باید کاهش داد و اگر مواد سنگین از بخش ذرات سبک خارج شوند، عکس این عمل صورت می گیرد. بهترین شیب میز، شیبی است که ذرات کانی سنگین در امتداد طول نیز از ذرات کانی سبک (مانند زغال) سریع تر حرکت کنند.

میزان شیب طولی میز به دانه بندی و چگالی دانه ها بستگی دارد. هر چه ابعاد دانه ها بزرگتر و چگالی آن ها بیشتر باشد، مقدار این شیب نیز بیشتر است. در هر صورت میزان اختلاف ارتفاع دو لبه ی میز در جهت طول نباید کمتر از ارتفاع موانع موجود روی سطح میز باشد. چون در صورت بهینه نبودن آن ، جریان آب تمایل به حرکت در امتداد موانع خواهد داشت.

سطح میز معمولاً از چوب ساخته می شود و توسط پوششی با ضریب اصطکاک زیاد مثل لینولئوم، پلاستیک و لاستیک پوشیده شده است. معمولاً به هنگام پر عیار سازی، بخصوص در آرایش مواد نرمه باید در انتخاب جنس سطح میز، دقت خاصی را بکار برد. موانع موجود در سطح میز برای افزایش ظرفیت پر عیار شوندگی میز، توزیع و پخش مناسب بار اولیه در سطح میز، ایجاد کانال های مناسب برای اجرای سقوط با مانع و چکیده شدن ذرات و هدایت مناسب ذرات ریز و درشت سنگین به بخش انتهایی میز طراحی می شوند.

برای پر عیار سازی ذرات درشت از موانع با ارتفاع زیاد و برای پر عیار سازی نرمه ها، از موانع با ارتفاع کم استفاده می شود. فاصله ی بین موانع با توجه به ابعاد ذرات تنظیم می شود و معمولاً از سه برابر بزرگ ترین ابعاد ذرات بیشتر است. پر عیار شدن در میزها معمولاً در انتهای میز و در جایی که مانعی وجود ندارد صورت می گیرد. در این بخش معمولاً ضخامت لایه دانه ها معادل با دو برابر قطر یک دانه است. دانه بندی بار ورودی باید محدود باشد. امروزه محدوده اندازه بار ورودی به کلیه میزهای لرزان به حدود ۲ میلی متر محدود می شود. در مورد زغالسنگ ذراتی تا ۱۵ میلی متر را هم توسط میز می توان شستشو داد و تا ابعاد ۳۰ میلی متر نیز به وسیله ی دستگاه هایی با ظرفیت بسیار زیاد امکان پذیر است. حداقل ابعاد ذرات که توسط میز پر عیار می شوند به حجم آب شستشو و حرکت میز بستگی دارد.

وسیله مناسب برای تغذیه میز لزران ، کلاسیفایر است. زیرا در این وسیله دانه های کوچک کانی سنگین در یک

بخش جمع آوری می شوند و همان طوری که ملاحظه شد، جدایش این نوع دانه ها توسط میز به خوبی امکان پذیر است.

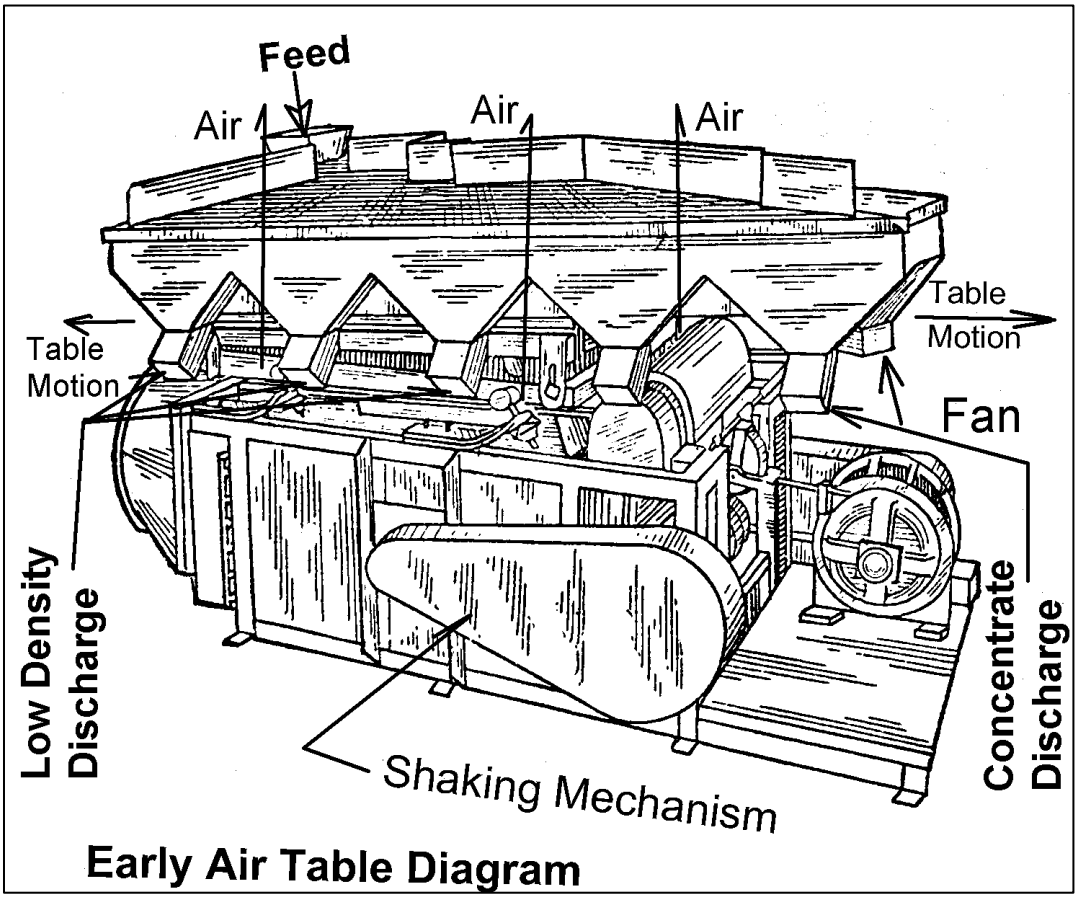
هنگامی که میز به عنوان یک دستگاه رافر عمل می کند و عیار کنسانتره رافر نسبت بـه بازیـابی چنـدان اهمیـت ندارد آماده سازی مقدماتی بار اولیه ضروری است. آماده سازی بار اولیه کارآیی و بازدهی دستگاه را افزایش می دهد.

۵-۵- میز لرزان هوایی (Pneumatic Table)

میزهای لرزان و همچنین سایر روش های ثقلی احتیاج به آب نسبتا زیادی دارند. این امر ممکن است بـا توجـه به هزینه لازم برای تامین آب در مناطق کم آب و همچنین هزینه های مربوط به آبکش کـردن و خشـک کـردن مواد به قدری باشد که مانع استفاده از این روش ها شود. همچنین امکان دارد مـاده معـدنی تحمـل رطوبـت را نکند و یا در آب محلول باشد. سرانجام ممکن است درجه حرارت منطقه در بعضی از فصـول سـال بـه حـدی باشد که آب منجمد شود. در چنین شرایطی می توان از روش های آرایش ثقلی خشـک اسـتفاده کـرد. اصـول میزهای لرزان هوایی همانند میزهای لرزان آبی است. این میزها از یک سطح متخلخل تشکیل شده اند که دارای شیب کمی هستند. برای به حرکت درآوردن دانه ها بر روی میز از مکانیزم نوسانی استفاده شده اسـت. جریـان هوا نیز از بستر میز به لایه متشکل از دانه ها دمیده می شود. سطح میز مشابه میزهای لـرزان آبـی از مـوانعی در امتداد طول میز پوشیده شده است. لایه بندی دانه ها در این حالت کمی بـا لایـه بنـدی مـواد در میزهـای آبـی متفاوت است. در میزهای آبی لایه بندی دانه ها در پشت موانع به نحوی است که از پایین به بالا ابعاد دانـه هـا بیشتر شده چگالی آن ها کمتر می گردد. در صورتی که در میزهای هوایی ابعاد و چگالی دانه ها هر دو در ایـن جهت کم می شوند. در حقیقت با توجه به جریان رو به بالای هوا از بسـتر متخلخـل، میزهـای هـوایی مشـابه کلاسیفایرها مواد را طبقه بندی می کنند.

از میزهای هوایی در برخی از کارخانجات زغالشویی برای آرایش زغالسنگ استفاده شده است. مزیت آن نسبت به روش های تر، تهیه محصولی خشک از زغالسنگ و در نتیجه حذف هزینه هـای مربـوط بـه خشـک کـردن محصول نهایی است. همچنین این وسیله همراه با روش های مغناطیسی و الکتریکی برای آرایـش ماسـه هـای

ساحلی استفاده شده است. کاربرد عمده میزهای هوایی در آرایش آمیانت یا پنبه نسوز مـی باشـد. شـکل ۳-۲۹ نمایی از یک میز هوایی را نشان می دهد.



شکل ۳-۲۹- نمایی از یک میز هوایی

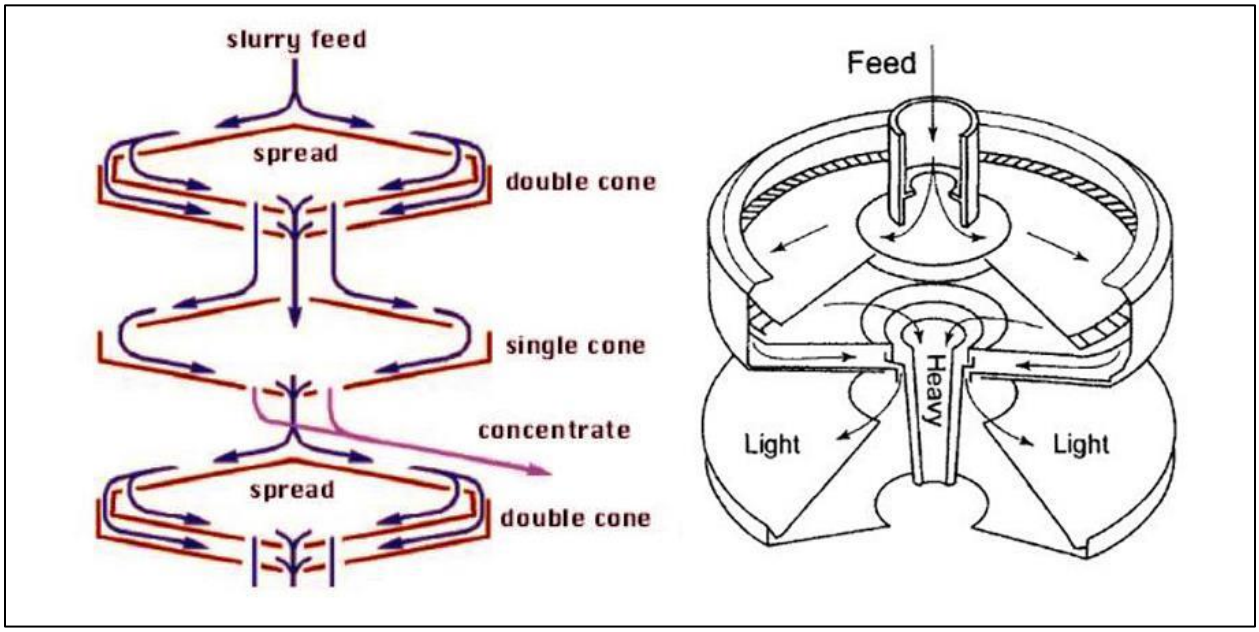
۵-٦- جداکننده مخروطی (Reichert Cone)

جدا کننده های مخروطی برای پر عیار کردن ثقلی مواد در ظرفیت های زیاد بـه کـار مـی رود. در سـال ۱۹۶۰ دستگاهی تحت عنوان مخروط ریچارد (شکل ۳-۳۰) برای آرایش ماسه های سـاحلی تیتـانیوم دار در اسـترالیا مورد استفاده قرار گرفت و با توجه به کاربرد موفقیت آمیز آن، در زمینه های دیگر مانند آرایش زغالسنگ نیز به کار گرفته شد.

شکل ۳-۳۰-نمونه ای از مخروط جداکننده ریچارد

در این دستگاه تعدادی مخروط بر روی یک محور قائم مشترک قرار گرفته اند. ارتفاع آن ها ممکن است به ۶ متر هم برسد. جنس این مخروط ها فایبرگلاس است و هر یک از آن ها ممکن است ساده یا مضاعف هم باشند. ارتباط هر مخروط با بخش پایین تر توسط وسیله ای مشابه ناو انجام می گیرد که این خود می تواند باعث افزایش عیار محصول گردد. نحوه عملکرد به این ترتیب است که پالپ بوسیله توزیع کننده ای از اطراف محیط خارجی مخروط به طور آرام به داخل آن خوراک دهی می شود و مسیر رأس مخروط را طی می کند. بدین ترتیب مواد سنگین تر، لایه تحتانی را تشکیل داده و از طریق شکاف حلقه ای شکل در نزدیکی انتهای آن

خارج می شوند و ذرات سبک نیز از محور میانی دستگاه به خارج منتقل می شود. شکل ۳-۳۱ نمـایی از طـرز کار این مخروط ها را نشان می دهد. ظرفیت جدا کننده های مخروطی زیاد بوده، حدود ۶۵ تا ۷۰ تن در ساعت است. لیکن در شرایط استثنایی می توان از آن ها در شرایط کمتر (۴۰ تن بر ساعت) و یـا بیشـتر (۱۰۰ تـن بـر ساعت) است نیز استفاده کرد.



شکل ۳-۳۱- مکانیزم کار مخروط جداکننده

درصد جامد پالپ بین ۵۵ تا ۷۰ ٪ است. ابعاد بهینه ذرات برای مخروط ها بین ۱۰۰ تا ۶۰۰ میکرون است.

موفقیت کار مخروط ها در صنایع ماسه استرالیا، کاربرد آن ها را در مورد سـایر مـواد معـدنی توسـعه بخشـیده است. از جمله می توان پر عیار کردن اولیه طلا و قلع، بازیابی تنگستن و پر عیار کردن منیتیـت را نـام بـرد. در بسیاری از موارد ذکر شده، مخروط ها جایگزین مارپیچ ها و میزهای لرزان شده اند.

۵-۷- جدا کننده های مارپیچی (Spiral)

جدا کننده های مارپیچی طی سالیان زیادی در کانه آرایی دارای کاربردهای مختلفی بوده اند و یا به طـور یقـین بیشترین کاربرد آن ها در مورد کانسارهای ماسه ساحلی دارای کانی های سنگین بوده است. این دسـتگاه بـرای اولین بار در سال ۱۹۴۵ برای آرایش زغالسنگ به کار گرفته شد. اولین مـارپیچ صـنعتی سـاخته شـده، مـارپیچ همفری بوده است و تا چند سال اخیر کلیه ی مارپیچ های ساخته شده بر اساس مارپیچ همفری بوده انـد. ولـی اخیراً تکامل قابل توجهی در تکنولوژی مارپیچ به عمل آمده است. از معروف ترین نسل جدید این وسایل مـی توان به نوعی از آن ها اشاره کرد که در آن از آب برای شستشو استفاده نمی شود و تنها یک مجرا برای دریافت مواد سنگین در قسمت پایین مارپیچ وجود دارد. این نوع از مارپیچ ها ارزان قیمتنـد و هزینـه نگهـداری آن هـا کمتر است.

این وسیله از یک مقطع شبه نیم دایره تشکیل شده است. بار اولیه با ابعادی حدود ۳ میلی متر تا ۷۵ میکرون بـه صورت پالپی با غلظت ۱۵ تا ۴۵ ٪ جامد از قسمت بالای مارپیچ وارد آن می شود.

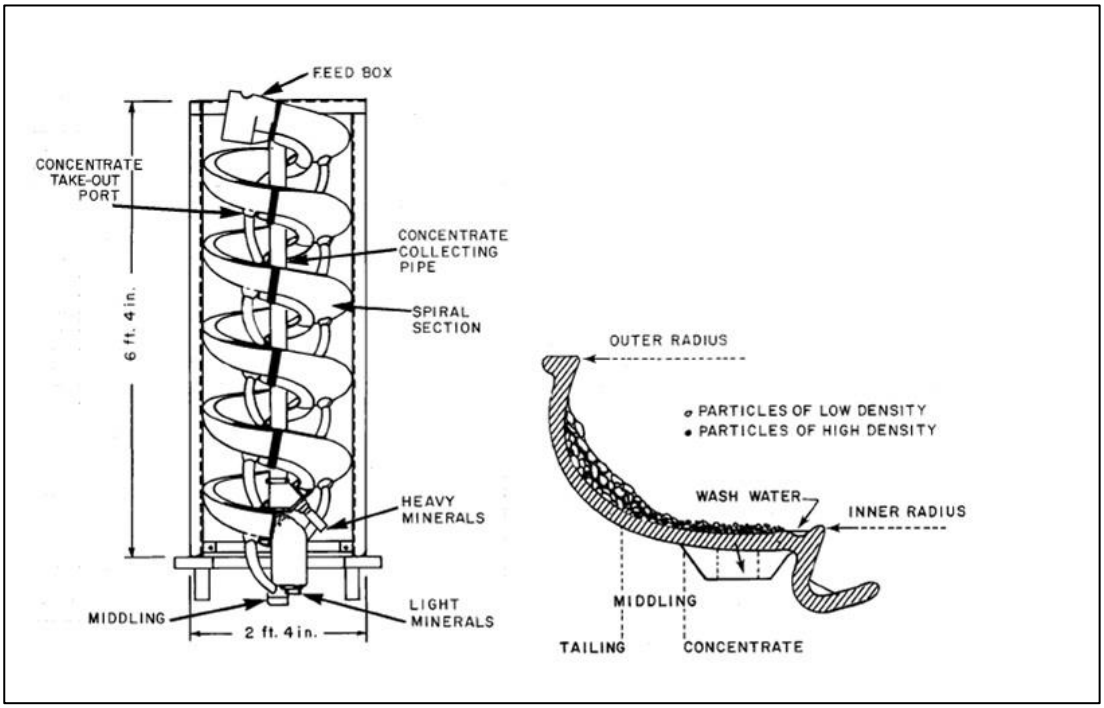
پس از شکل گیری صحیح جریان ، به صورت پالپی همگن و یکنواخت روی مسیر مارپیچی مطابق شکل کـانی های سنگین بخش داخلی و کانی های سبک (مانند زغال) به همراه آب، تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز بخش خارجی مارپیچ را اشغال کرده به سمت پایین می آیند.

دلیل لایه بندی مواد در جریان مارپیچی در جهت قائم، تأثیر ترکیبی سقوط با مانع و چکیده شدن ذرات اسـت. در محدوده فضای مارپیچ، نیروی برشی با آهنگ نسبتاً زیادی حاکم است. به همین خاطر نیرویی تحـت عنـوان Back Nold را هم می توان در جریان حرکت پالپ به سمت پایین در نظر گرفت. این نیرو عبارت اسـت از : نیروی عمود بر سطح برش و یا به عبارتی عمود بر سطح جریان که مخالف نیروی ثقل است.

پارامتر دیگری که در مارپیچ ها مطرح می باشد جریان آب شستشو در ابتدای محور مارپیچ است که باعث جدا شدن ذرات سبک از ذرات سنگین و انتقال آن ها به بخش خارجی مارپیچ می گردد. در شکل ۳-۳۲ مسـیر آب شستشو در نزدیکی محور مشخص است.

شکل ۳-۳۲- محل ورود آب شستشو به مارپیچ

همان گونه که در شکل ۳-۳۳ نیز مشخص است در هر مارپیچ مجراهایی برای خروج ذرات سنگین وجود دارد به طوری که با خروج تدریجی ذرات در طول مسیر، عیار بخش باقی مانده ی ذرات کاهش می یابد و در انتهای مسیر فقط ذرات سبک (زغال) خارج می شوند. کلیه ی مارپیچ ها در دو دسته ی با مجرای متعدد و مجرای محدود تقسیم می شوند که نوع اول مثل مارپیچ های همفری و نوع دوم نسل جدید مارپیچ ها هستند.

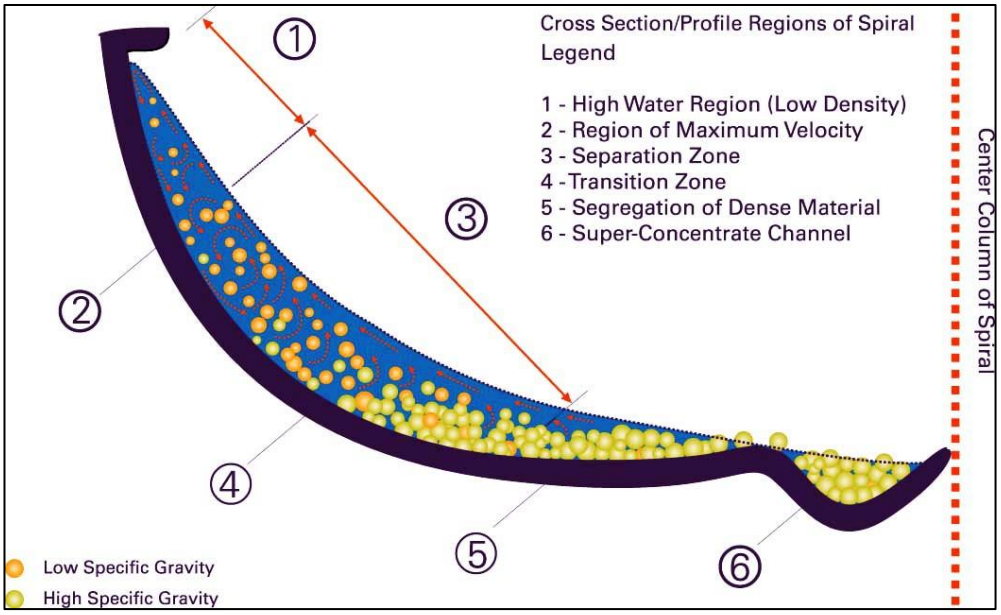


شکل ۳-۳۳- نمایی از یک مارپیچ

مارپیچ همفری: مارپیچ همفری در سال ۱۹۴۳ ساخته شده است و اولین کاربرد صنعتی آن آرایش ماسه های کروم دار بوده است. این مارپیچ ها با شیب های مختلفی ساخته شده اند. نوع کم شیب آن برای کارهای دقیق تر مثل جدا کردن کانی هایی که اختلاف چگالی آن ها کم است و نوع پر شیب آن که ظرفیت بیشتر ولی عیار کمتری دارد و برای جدا کردن موادی بکار می رود که ضریب پر عیار سازی آن ها بیش از 1.6 باشد. ظرفیت مارپیچ های کم شیب ۱ تا ۳ تن در ساعت و نوع پر شیب آن ها به دو برابر این مقدار می رسد. نوع استاندارد این دستگاه با پنج یا هفت پیچ به منظور پر عیار سازی اولیه به کار می رود و از نوع سه پیچ آن برای پر عیار سازی نهایی استفاده می شود. معمولاً در آرایش زغالسنگ از نوع شش پیچ و با شیب کم استفاده می شود.

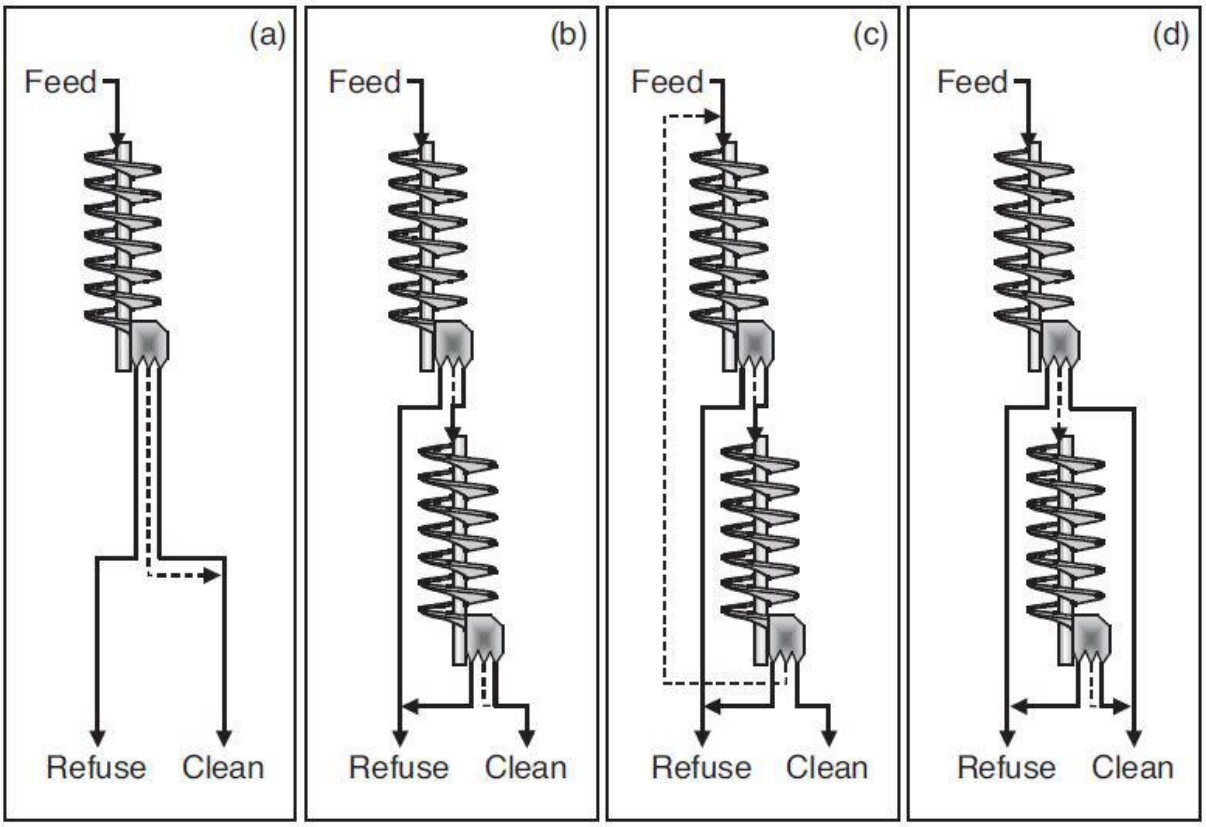
از حدود سال ۱۹۷۰ نوع مضاعف این مارپیچ ها ساخته شده اند که دارای دو محل جداگانه برای ورود بار اولیه هستند. این مدل به منظور افزایش بازدهی و صرفه جویی در فضا، ساخته شده است. لذا سیستم توزیع پالپ اهمیت خاصی دارد و عدم یکنواختی در نحوه ورود پالپ به سیستم می تواند بازیابی عملیات را به شدت کاهش دهد. قابل ذکر است که اثرات منفی بازدهی کمتر از حد، بیشتر از بازدهی بیش از حد است. یک مارپیچ مضاعف قادر است که در هر ساعت ۵ تا ۱۰ تن بار اولیه را آرایش دهد.

مارپیچ ریچارد : این مارپیچ معمولاً به صورت مضاعف ساخته می شود. جنس آن فایبر گلاس و پوشش آن پلی اورتان است. از محسنات این سیستم می توان به جریان یکنواخت پالپ، سهولت جریان و انعطاف زیاد اشاره کرد. در شکل ۳-۳۴ نحوه آرایش ذرات سبک و سنگین، روی سطح مقطعی از یک مارپیچ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۴- نحوه آرایش ذرات روی مارپیچ

در بسیاری از موارد تعدادی از مارپیچ ها در آرایش های مختلف به صورت سری قرار می گیرند. نحوه چیدمان این مارپیچ ها و نوع آرایش به کار گرفته شده بستگی به اهداف پر عیار سازی دارد. در شکل ۳-۳۵ چند نوع چیدمان مختلف از مارپیچ ها با هم مقایسه شده اند. حالت a یک رافر تک مارپیچ را نشان می دهد. حالت b سیستم رافر- کلینر بدون جریان برگشتی را نشان می دهد. حالت c سیستم رافر- کلینر با برگشت محصول میانی را نشان می دهد و حالت d که متداول تر است رافر- کلینر با پرعیار سازی محصول میانی مارپیچ اول را نشان می دهد.

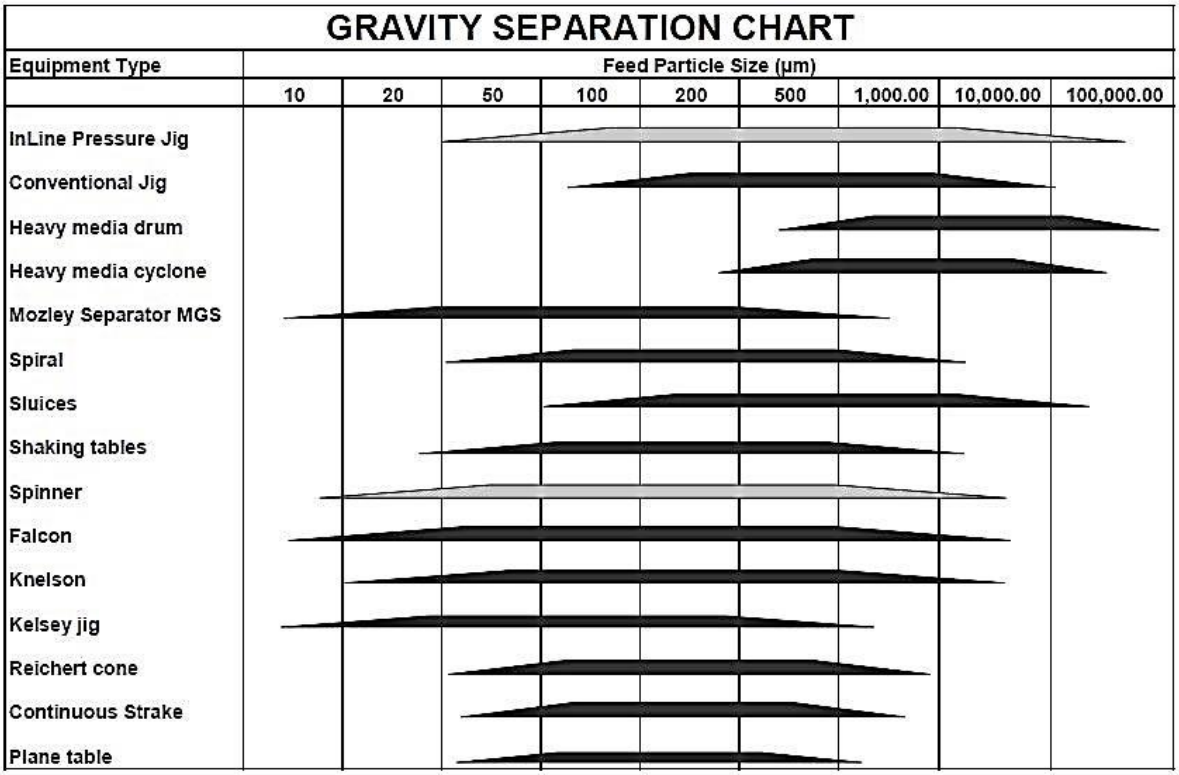


شکل ۳-۳۵- چیدمان های مختلف دو مارپیچ

۵-۸- دستگاه های جداساز نرمه و ذرات ریزدانه با استفاده از جریان لایه نازک آب

با کاهش ذخایر سنگ های پر عیار و افزایش تقاضا برای فرآوری مواد معدنی، استفاده از سنگ های کم عیار ایجاب می کند که جهت رسیدن به درجه آزادی قابل قبول، ابعاد ذرات بیش از پیش کاهش یابد و نتیجه مستقیم این فرآیند، تولید نرمه بیشتر است. ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون که در این فصل به آن ها ذرات ریزدانه می گوییم و همچنین ذرات کوچکتر از ۱۵ میکرون که آن ها را نرمه می نامیم، توسط روش های معمول ثقلی مانند جیگ و میز ومارپیچ قابل جداسازی نیستند. . دستگاه های متداول جداکننده گرانشی، به دلیل پایین بودن شتاب ثقل زمین که نیروی محرکه آن ها می باشد قادر به جداسازی ذرات نرمه و بسیار ریز نمی باشند. جداکننده های سانتریفیوژی با استفاده از شتاب حاصل از نیروی گریز از مرکز که چندین برابر شتاب ثقل زمین می باشد، این مشکل را بر طرف کرده اند. در شکل۳-۳۶ انواع دستگاه های جداکننده ثقلی جدید و

قدیمی و محدوده ابعاد ذراتی که دستگاه های مزبور، کارائی کافی برای جداسازی دارند، با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۳-۳۶- محدوده کارائی انواع جداکننده های گرانشی

در ادامه برخی از دستگاه های جداکننده ثقلی که قابلیت جداسازی ذرات ریز و نرمه را دارند بررسی می کنیم.

۵-۸-۱- جداکننده MGS

جداکننده های (MGS) یا (moezly multi gravity separator) به عنوان تجهیزات امیدوارکننده ای برای جداسازی ذرات نرمه گزارش شده اند. این تجهیزات برای فرآوری ذراتی با ابعاد حداکثر 0.5 میلی متر مناسب می باشند. این جداکننده ها بر مبنای تفاوت خواص ثقلی پایه گذاری شده اند. موفقیت در حصول کنسانتره ای با خصوصیات مورد نظر، بستگی به انتخاب شرایط عملیاتی مناسب و نوع کانی های مورد استحصال دارد.

پایه طراحی و ساخت این جداکننده ها بر گرفته از تئوری ارائه شده توسط ریچارد موزلی انگلیسی است. برای این که تصویری از اصول اساسی طراحی این جداکننده ها داشته باشیم، تصور کنید که همان سینی های لرزان متداول را به صورت درام استوانه ای درآورده و آنرا حول یک محور افقی می چرخانیم. این کار سبب استفاده از نیروی گرانش تقویت شده که چندین برابر شتاب گرانش معمول ثقلی است می گردد. این گرانش روی جریان سطحی ذرات کانی اعمال می شود و سبب بهبود فرآوری ذرات نرمه در مقایسه با سینی های لرزان متداول می شود. در شکل های ۳-۳۷ و ۳-۳۸، نمایی از جداکنند های MGS و چگونگی کارکرد آن ها نشان داده شده است. شکل ۳-۳۹ نیز تصویری از یک نمونه تجاری از این دستگاه می باشد. این دستگاه اساسا شامل یک درام است که با زاویه کم به صورت مخروطی با انتهای باز در آمده و طول آن 0.6m و قطر آن 0.5m است. درام با سرعت متغیر بین ۱۴۰ و ۳۰۰ دور بر دقیقه در جهت عقربه های ساعت می گردد و این موضوع سبب ایجاد نیروی گرانشی بین ۶ تا ۲۴ برابر شتاب گرانش زمین می شود. یک لرزش سینوسی نیز با دامنه نوسان مختلف که بین ۱۲ تا ۲۵ میلی متر متغیر است در جهت محوری اعمال می شود. فرکانس لرزش بین ۲ تا ۶ سیکل در ثانیه متغیر است. در داخل درام زبانه های جمع کننده وجود دارد که در جهت عقربه های ساعت با سرعتی کمی بیشتر از سرعت درام می چرخند. پارامترهایی که عملکرد این جداکننده را تحت تاثیر قرار می دهند عبارتند از: سرعت درام، زاویه شیب، دامنه لرزش، فرکانس لرزش، سرعت جریان آب شستشو و خوراک جامد ورودی. دوغاب خوراک از طریق یک حلقه روزنه دار در وسط درام روی سطح داخلی آن می ریزد تا اثر تلاطم ناشی از ورود خوراک کاهش یابد.

آب شستشو از یک حلقه روزنه دار مشابه از طرف انتهای باز درام وارد می شود. جریانی از فیلم مایع روی سطح داخلی درام شکل می گیرد. مطالعات نشان می دهند که جریان دوغاب روی سطح داخلی درام چرخان از الگوی مارپیچی تبعیت می کند. ذرات سنگین تر یا ذراتی که دانسیته بالاتری دارند، تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز، ضخامت لایه دوغاب را طی کرده و به شکل یک لایه شبه جامد به سطح درام می چسبند. یک لایه میانی، بالای این لایه شکل می گیرد که از سوسپانسیون رقیق تری از دوغاب که شامل ذرات سبک تر است تشکیل شده است. لایه بالایی از آب نسبتا شفاف تشکیل شده است. لرزش، یک نیروی برشی مضاعف روی ذرات داخل فیلم مایع اعمال می کند که باعث بهبود جداسازی می شود. همزمان زبانه های جمع کننده که در

طول سطح درام بطور پیوسته حرکت می کنند، ذرات ته نشین شده را جهت جلوگیری از دنباله روی، جمع آوری می کنند. بنابراین ذرات دارای چگالی بالا که به سطح درام دوخته شده اند، بطور پیوسته به سمت شیب درام جارو می شوند و همزمان در معرض جریان آب شستشویی قرار می گیرند که در جهت مخالف در جریان است و قبل از تخلیه شدن از قسمت جلویی درام به عنوان کنسانتره، شسته می شوند. کانی های سبک تر همراه با جریان آب شستشو به عنوان باطله از انتهای دیگر درام تخلیه می شوند.

مزایای این جدا کننده ها عبارتند از:

۱- برای ذرات نرمه، جداسازی آن ها بسیار انتخابی است. (معمولا ذرات بین ۷۵- تا ۱۰ میکرون)

۲- نسبت پر عیار کنی بالایی دارند (معمولا ۲۰ به ۱)

معایب این جداکننده ها عبارتند از:

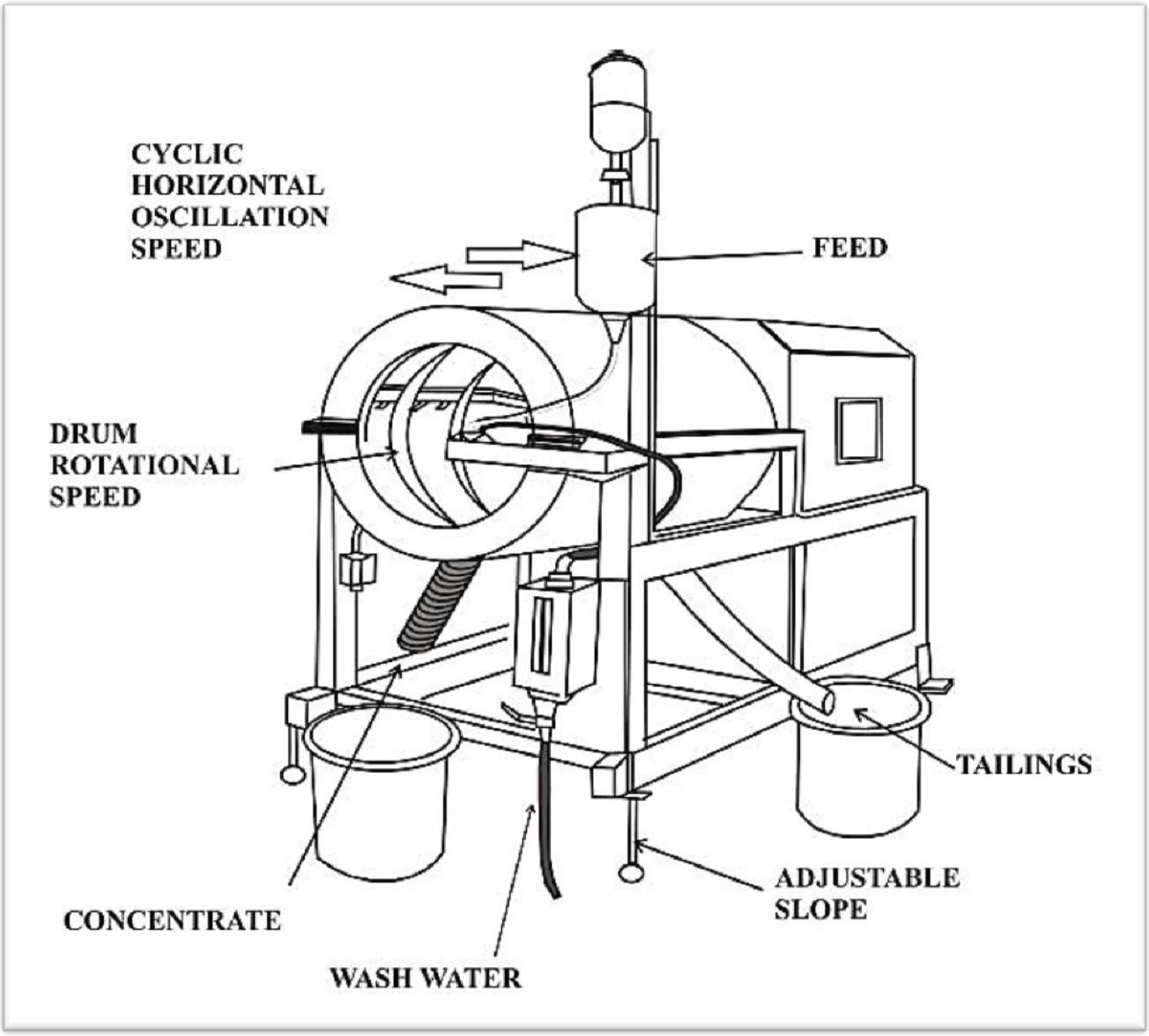
۱- بطور کلی ظرفیت پایین دارند (اگرچه جداکننده های بزرگ تر و با ظرفیت بیشتر نیز هم اکنون ساخته شده اند)

۲- ساختار مکانیکی بسیار پیچیده ای داشته و گران قیمت اند.

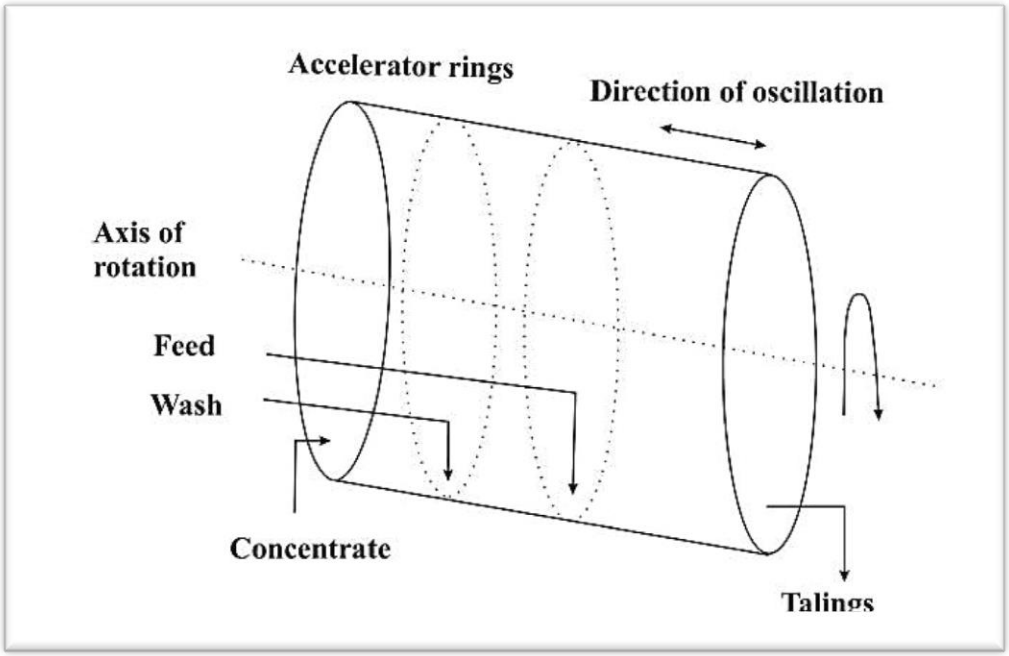
۳- کاملا محصور و پوشیده بوده و سطح جدایش قابل رویت نیست.

۴- نیاز به مراقبت شدید توسط اپراتور دارد.

۵- برای ذرات درشت مناسب نیست و بنابراین خوراک قبل از ورود بایستی سرند شود.



شکل ۳-۳۷- نمایی ازیک جداکننده ***MGS***

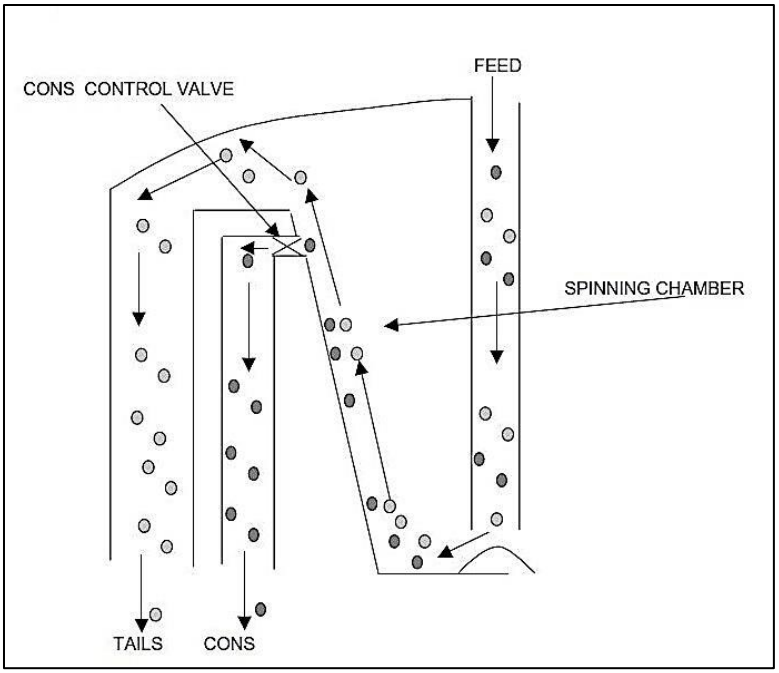


شکل ۳-۳۸- مکانیزم جداسازی در جداکننده MGS

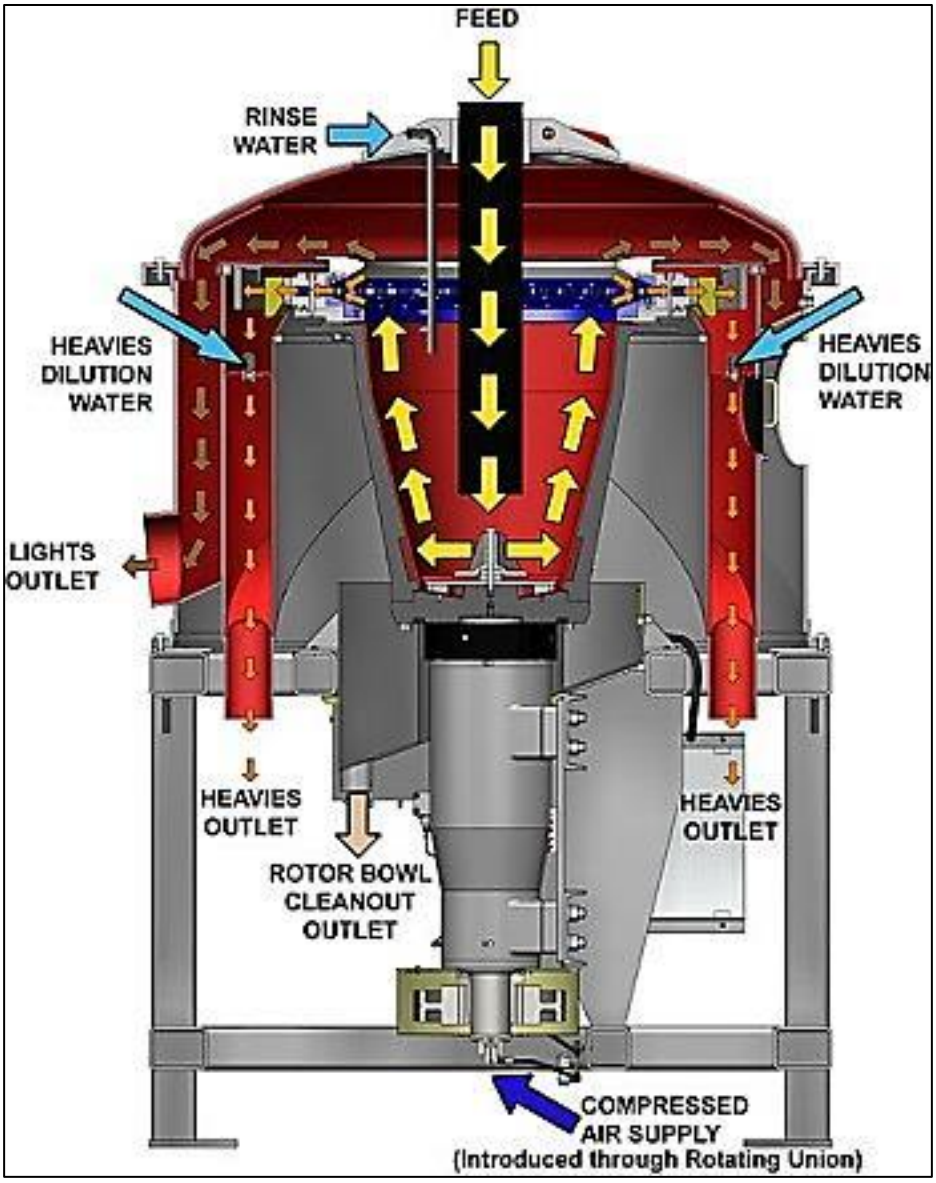
شکل ۳-۳۹- نمونه تجاری از دستگاه های جداکننده MGS

۵-۸-۲- جداکننده های فالکون (Falcon Concentrators)

جدا کننده های نیمه پیوسته فالکون توانایی تولید شتاب گرانشی معادل ۵۰ تا ۲۵۰ برابر شتاب گرانش زمین دارند. ظرفیت آن ها تا ۴۰۰ تن بر ساعت نیز گزارش شده است. اساس این دستگاه بر مبنای ترکیبی از نیروی گریز از مرکز و یک سیستم تخلیه مناسب پایه گذاری شده است. قابلیت این دستگاه در سرعت های چرخشی بالا و در نتیجه شتاب گرانشی افزایش یافته (g) توسط نیروی گریز از مرکز، سبب کارائی بالای آن در جداسازی ذرات نرمه با دانسیته های مختلف می شود. شکل کاسه چرخان به گونه ای طراحی شده که همزمان با بالا رفتن دوغاب از کاسه، ذرات سنگین تر نسبت به ذرات سبک تر، بیشتر تحت تاثیر نیروی گرانشی حاصل از نیروی گریز از مرکز واقع می شوند. این موضوع سبب مهاجرت ذرات سنگین تر به سمت سطح تماس دوغاب و کاسه شده و ذرات سبک تر نیز همراه با آب در قسمت بالایی لایه تشکیل شده توسط جریان دوغاب قرار می گیرند. جداسازی توسط خارج کردن لایه پایینی و سنگین تر دوغاب، توسط روزنه هایی که تحت فرمان یک سیستم کنترلی، باز و بسته می شوند صورت می گیرد و لایه بالایی نیز به قسمت باطله وارد می شود. (شکل ۳-۴۰ و ۳-۴۱)



شکل ۳-۴۰- برش عرضی از یک جدا کننده پیوسته فالکون



شکل ۳-۴۱- نمای دیگری از یک جداکننده فالکون

عوامل موثر بر کارائی این دستگاه عبارتند از:

۱- سرعت چرخش: با افزایش سرعت چرخش شتاب گرانشی ناشی از نیروی گریز از مرکز روی خوراک افزایش یافته و جداسازی بهبود می یابد.

۲- فرکانس باز و بسته شدن روزنه های خروجی کنسانتره: با افزایش فرکانس، وزن کنسانتره خروجی بیشتر خواهد شد.

۳- نرخ خوراک ورودی و درصد جامد آن: هرگاه نرخ خوراک و درصد جامد آن از یک ماکزیمم مشخص بالاتر رود، جدایش صورت نخواهد گرفت.

مزایای این دستگاه عبارت است از:

۱- توانایی فرآوری ذراتی با ابعاد کمتر از ۱۵ تا ۲۰ میکرون

۲- ساختار مکانیکی نسبتا ساده و قدرتمند

۳- ظرفیت نسبتا بالا

۴- نسبتا نیاز به مراقبت زیادی ندارد

معایب این دستگاه عبارتند از:

۱- نسبت پر عیار کنی نسبتا پایین (حدود ۲ به ۱)

۲- سطح جدایش قابل رویت نیست.

۳- ابعاد ذرات خوراک ورودی بایستی کوچکتر از قطر روزنه های خروجی کنسانتره باشند تا آن ها را مسدود نسازند از این رو خوراک قبل از ورود بایستی غربال شود.

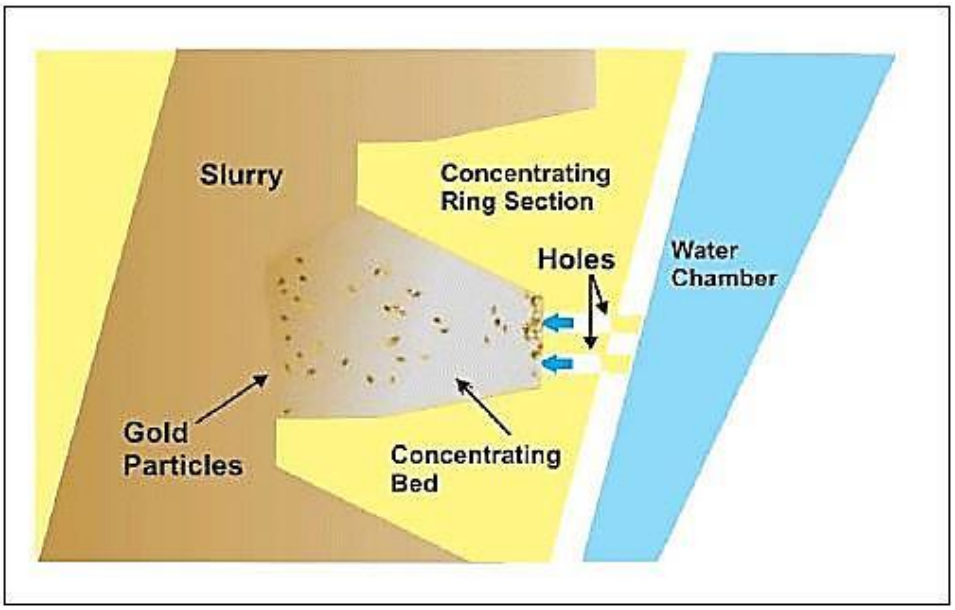
جداکننده نلسون

۵-۸-۳- جداکننده نلسون (Knelson)

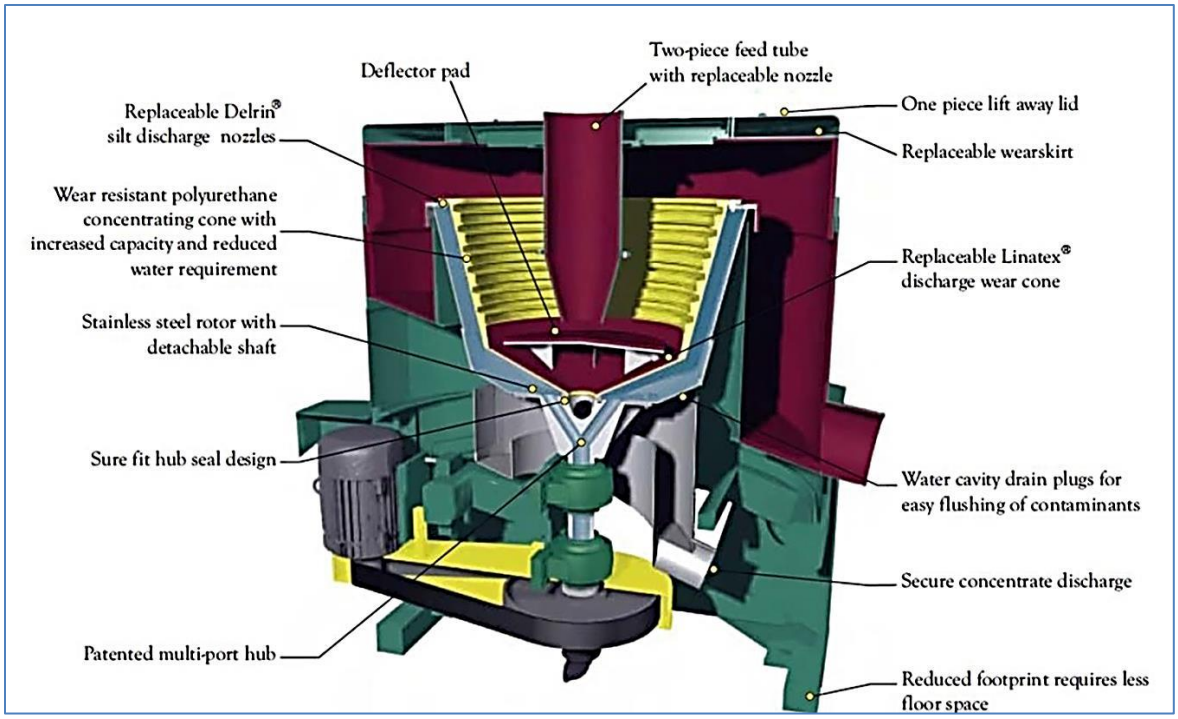
جداکننده های نلسون ابتدا در سال ۱۹۸۰ به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفت و در میان جداکننده های گرانشی سانتریفیوژی بیشترین موارد استفاده را به خود اختصاص داده است. ظرفیت این دستگاه ها تا ۶۵۰ تن بر ساعت نیز گزارش شده است.

طرز کار این دستگاه به این صورت است که ابتدا آب از طریق روزنه هایی که داخل شیارهای حلقه ای تعبیه شده اند وارد دستگاه می شود. این جریان آب باعث سیالی شدن ذرات خوراک شده و از فشردگی کل ذرات

داخل دوغاب خوراک، در داخل حلقه ها جلوگیری می کند. در عین حال ذراتی که دانسیته بـالاتری دارنـد، بـا غلبه بر سیستم سیالی شده، داخل شیارهای حلقه ای روی سطح مخروطی به دام می افتند. ذرات دارای چگـالی کمتر، قادر به شکافتن بستر سیالی شده و نفوذ به داخل شیارها نبوده و همراه با جریان پیوسته دوغاب، از طریق سرریز کاسه داخلی به باطله راه می یابند. در شکل های ۳-۴۲ و ۳-۴۳ نمایی از این جداکننده و مکانیزم حاکم بر آن آورده شده است و شکل ۳-۴۴ نمایی از کنسانتره تولید شده در یک جداکننده نلسون در پایـان عملیـات نشان داده شده است:



شکل ۳-۴۲- مکانیزم ورود آب به جداکننده نلسون

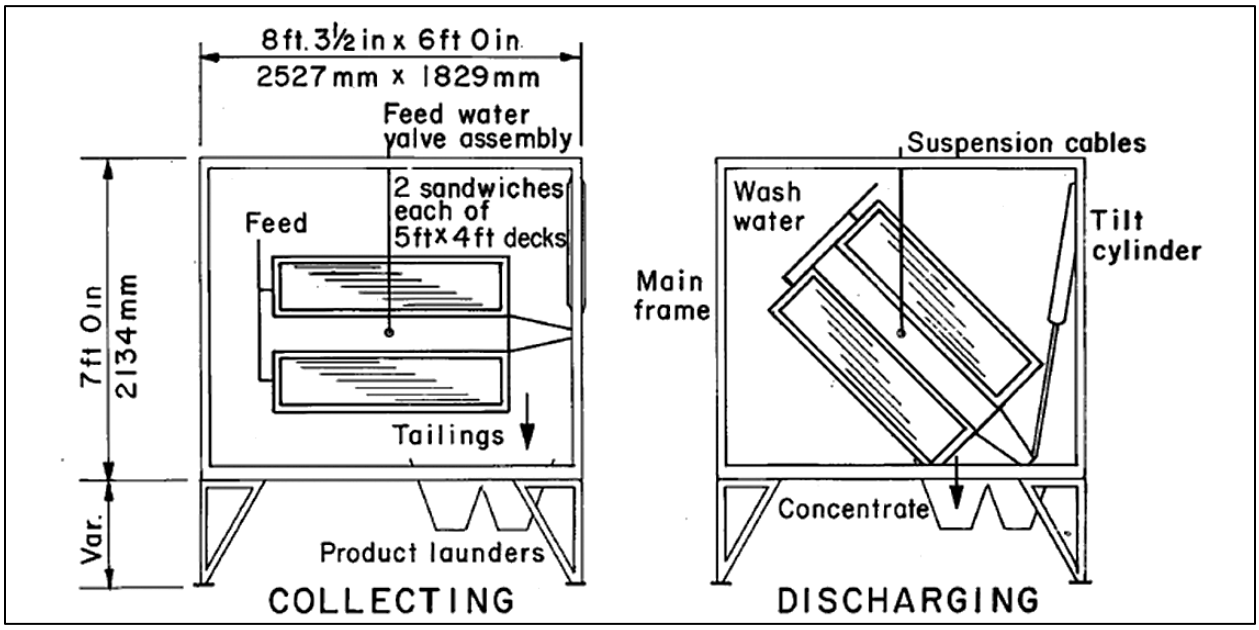


شکل ۳-۴۳- نمایی از برش عرضی جداکننده نلسون

شکل ۳-۴۴- نمایی از کنسانتره تولید شده در پایان عملیات در جدا کننده نلسون

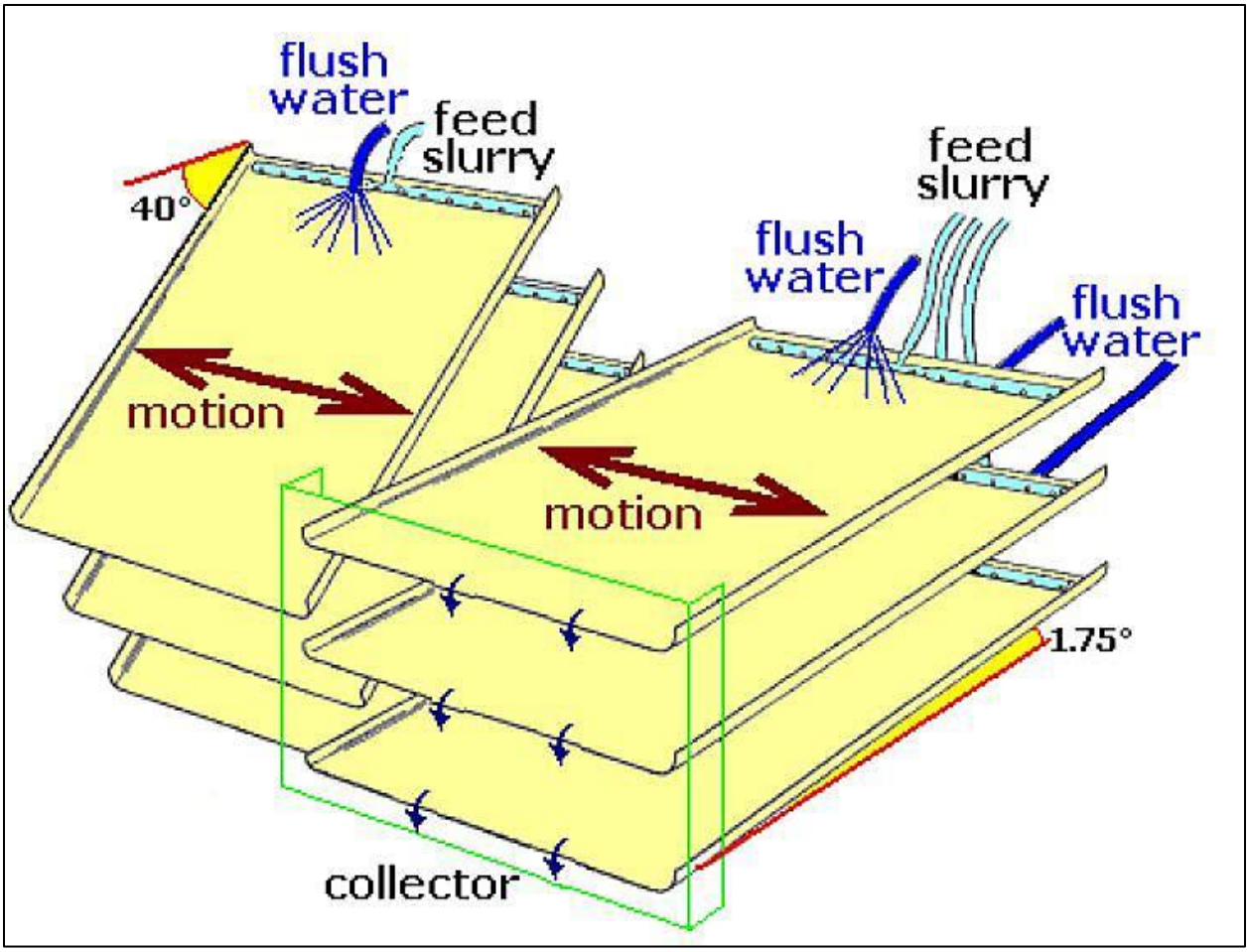
۵-۸-٤- جداکننده بارتلز موزلی یا میز نرمه (Bartles- Mozely Table)

در اکثر روش های ثقلی، ابعاد دانه های قابل آرایش به حدود ۱۰۰ میکرون محدود می شود. با ابداع میزهای نرمه تحول قابل توجهی در آرایش ثقلی مواد دانه ریز حاصل شده است. این وسیله از ۴۰ صفحه از جنس فایبرگلاس با سطح صاف به طول 1.5 و عرض 1.1 متر تشکیل شده است. این صفحات به صورت دو دسته ۲۰ تایی روی هم قرار گرفته اند و توسط دو رشته کابل به چهارچوب فلزی دستگاه آویزان شده اند. فاصله صفحات از یکدیگر ۱۲ میلی متر است که توسط قطعات لاستیکی از هم جدا شده اند. در داخل این قطعات، مجرایی وجود دارد که بار اولیه به صورت پالپ از طریق آن بر روی صفحات توزیع می شود. میز نرمه به طور غیر پیوسته کار می کند. در مرحله باردهی، صفحات دارای شیب بسیار ملایمی هستند. پالپ ورودی از چهار نقطه در امتداد عرض آن ها وارد می شود. در این مرحله از کار، دانه های گانگ در امتداد طول میز حرکت می کنند و از انتهای میز خارج می شوند و کانی های سنگین بر روی میز باقی می مانند.



شکل ۳-۴۵- طرز کار میز نرمه

بعد از این مرحله، پالپ ورودی به طور اتوماتیک قطع شده، شیب صفحات کمی بیشتر می شود تا دانه های گانگ باقی مانده روی آن ها تخلیه شوند. سپس شیب آن ها به حدود ۴۵ درجه افزایش می یابد و جریان آبی بر روی صفحات هدایت می شود تا دانه های ته نشین شده بر روی آن ها را به خارج منتقل کند.

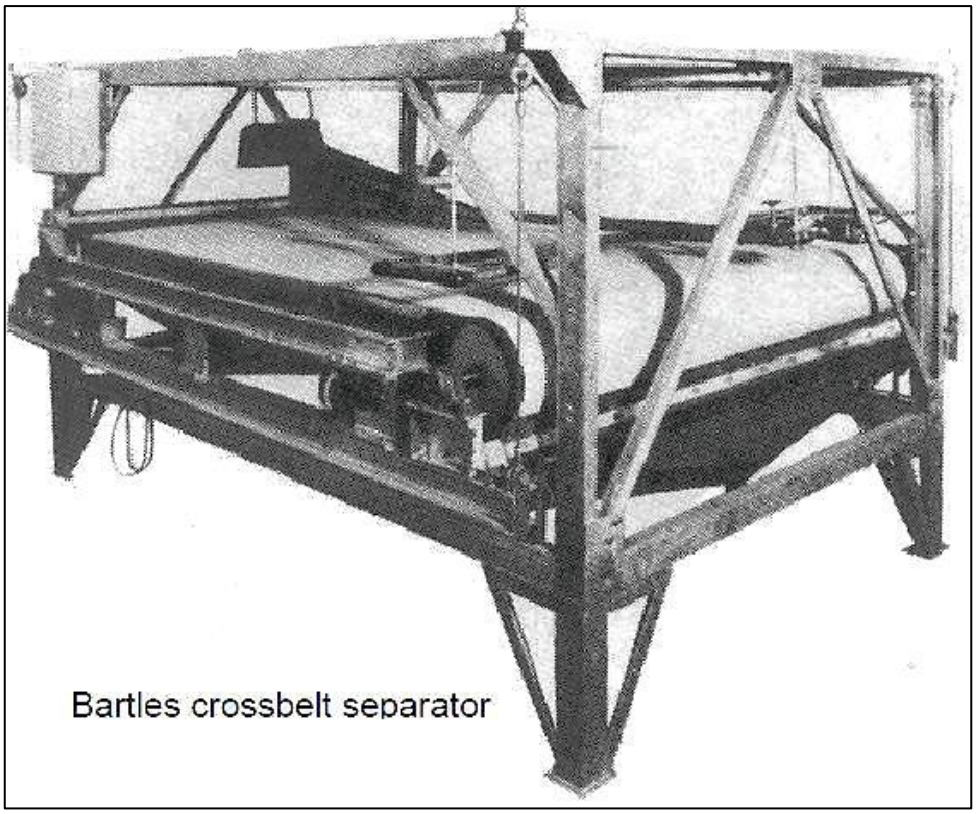


شکل ۳-۴۶- میز نرمه در دوحالت عملیات و تخلیه کنسانتره

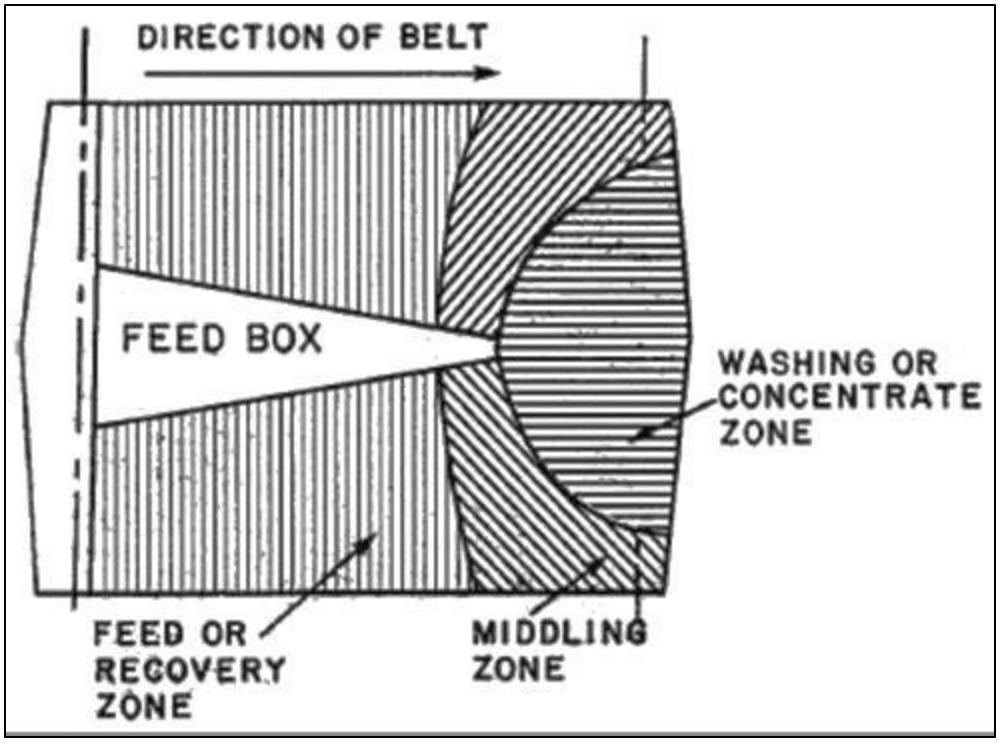
آنگاه شیر آب قطع می شود و میزها مجددا به حالت اولیه بر می گردند و پالپ اولیه بر روی آن ها جریـان مـی یابد. سیستم حرکت میزها و قطع و وصل کردن شیرها در این وسیله پنیوماتیکی است. توسط این وسیله امکـان آرایش مواد در ابعاد ۵ تا ۱۰۰ میکرون وجود دارد. از این وسیله ابتدا در انگلستان برای بازیابی کاسیتریت دانـه ریز استفاده شد و به تدریج برای بازیابی کانی های سنگین دانه ریـز از انبارهـای باطلـه معـادن قـدیمی مـورد استفاده قرار گرفت.

۵-۸-۵- جدا کننده نواری بی انتهای بارتلز (Bartles Crossbelt Concentrator)

این دستگاه شامل یک نوار بی انتها از جنس PVC به عرض 2.4 متر است که به طور افقی قرار گرفته است. سطح بالایی نوار از محور طولی به سمت دو لبه آن شیب ملایمی دارد. فاصله محور فلکه های نوار از یکدیگر ۳ متر است. ونوار از روی آن ها به آرامی حرکت می کند. به علاوه یک گردونه غیر متعادل ضربه هایی به نوار وارد می کند. این نوار توسط چهار رشته کابل آویزان شده است و به این ترتیب مستقل از چهارچوب آن است. بار اولیه در امتداد محور طولی نوار و در قسمت ابتدایی آن وارد می شود. کانی های سنگین بر روی نوار ته نشین می شوند در حالی که دانه های گانگ به کمک ضربه های وارد شده در امتداد شیب نوار حرکت می کنند و از لبه های آن خارج می شوند. در بخش میانی نوار با شستشوی مواد توسط جریانی از آب، محصول میانی به دست می آید. دانه های باقیمانده بر روی نوار به عنوان محصول پر عیار شده از انتهای نوار تخلیه می شوند. جدا کننده نواری بارتلز وسیله نسبتا جدیدی است که برای آرایش مواد دانه ریز مناسب است. توسط این وسیله می توان موادی با ابعاد ۵ تا ۱۰۰ میکرون را آرایش داد.



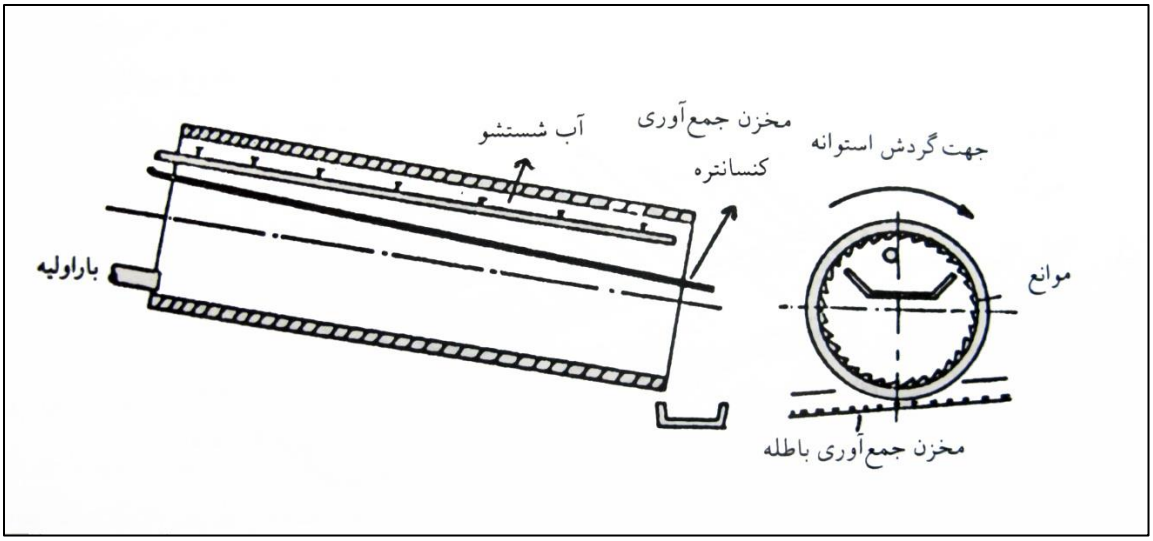
شکل ۳-۴۷- نمایی از یک جداکننده نواری بارتلز



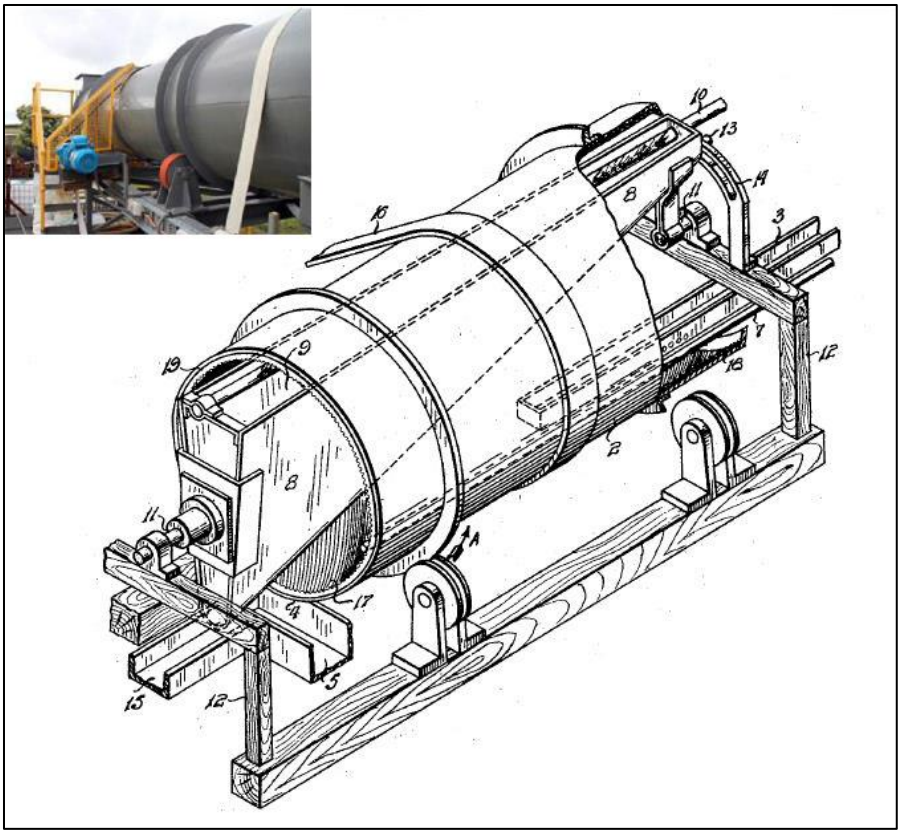
شکل ۳-۴۸- نواحی مختلف تشکیل شده روی نوار جداکننده بارتلز

۵-۸-٦- استوانه جانسون

این جدا کننده از استوانه گردانی به طول 3.6 متر و قطر 0.75 متر تشکیل شده است که با شیب نسبتا کمی (2.5 تا 5 درجه) کار می کند. بخش داخلی استوانه از موانع پلاستیکی پوشیده شده است. بار اولیه با غلظت زیاد به صورت پالپ وارد استوانه می شود و ذرات سنگین در پشت موانع ته نشین شده و با چرخش استوانه به بخش فوقانی هدایت و توسط آب شستشو از آن خارج می شوند. شکل ۳-۴۹ مکانیزم کار در جداکننده جانسون و شکل ۳-۵۰ نمای داخلی و بیرونی دستگاه را نشان می دهد. معمولا سرعت چرخش استوانه بین 0.1 تا 0.3 دور در دقیقه می باشد. استفاده از پالپ غلیظ در این نوع جداکننده باعث می شود تا چکیده شدن ذرات در سیکل عملیاتی انجام گیرد و به نظر می رسد که یکی از مکانیزم های اساسی جدایش باشد.



شکل ۳-۴۹- مکانیزم عملکرد استوانه جداکننده جانسون



شکل ۳-۵۰- نمای داخلی و خارجی استوانه جانسون

٦- جداسازی با استفاده از واسطه سنگین

هرچند نظریه جداکردن کانی ها توسط واسطه سنگین در قرن گذشته ارائه شده است اما در عمل این روش یکی از جدیدترین روش های آرایش ثقلی مواد می باشد که از سال ۱۹۴۰ به تدریج متداول شد. روش واسطه سنگین یکی از متداولترین و ساده ترین روشهای ثقلی پر عیار سازی مواد معدنی و شستشوی زغالسنگ است. همچنین برای تعداد زیادی از کانی ها از قبیل آهن، سرب و روی، کرم، منگنز، قلع، تنگستن، فلوئورین، منیزیت، سیلوین، گرونا، الماس و غیره استفاده شده است. چنانچه جرم مخصوص یک محیط سیال در حد واسط جرم مخصوص دو کانی مورد نظر باشد، کانی سنگین تر از واسطه، غرق و کانی سبک تر از واسطه شناور می شود. از این روش زمانی می توان استفاده کرد که بین دانسیته دو کانی اختلاف کافی وجود داشته باشد. در عملیات صنعتی چگالی رایج واسطه 1.3 تا 3.8 می باشد. این روش برای جدایش دانه ها در ابعاد نسبتا دانه درشت مناسب است. دانه بندی مناسب از نظر حد فوقانی محدودیت زیادی ندارد و قطعاتی به ابعاد ۳۰۰ میلی متر و گاهی بزرگ تر از آن نیز قابل آرایش هستند. از نظر حد پایینی، در وسایلی که در آن ها دانه ها تنها تحت نیروی ثقل ته نشین یا شناور می شوند حدود ۶ تا ۱۰ میلی متر و برای وسایلی که در آن ها دانه ها تحت نیروی گریز از مرکز قرار می گیرند، حدود 0.5 تا 1 میلی متر است. در این روش امکان جدایش کانی ها با دقت زیاد وجود دارد. سیال مورد استفاده می تواند مایعات سنگین، نمک های محلول و یا واسطه سنگین باشد. مایعات سنگین برخی مایعات آلی با دانسیته بالا می باشند. نمک های محلول نیز برای بالا بردن دانسیته آب به کار می روند. واسطه های سنگین سوسپانسیونی از آب و ذرات بسیار ریز یک ماده معدنی با دانسیته بالا هستند که مشابه یک سیال کاذب عمل می کنند و بیشترین کاربرد را دارند.

در جداکننده هایی که در آن ها مواد تحت تاثیر نیروی ثقل جدا می شوند، دو نیروی اساسی در جدایش مواد موثرند:

۱- نیروی ثقل

۲- نیروی مقاومت سیال.

این دو نیرو مخالف هم عمل می کنند. ذراتی که جرم مخصوص آن ها معادل جرم مخصوص واسطه باشد، در همان حوالی به صورت غوطه ور باقی می مانند. ذراتی که دارای ابعاد کوچکی هستند به رغم داشتن جرم مخصوص زیاد یا کم در زمان مخصوص، شناور یا غرق نمی شوند و به همین دلیل شاید به عنوان ذراتی که باعث از بین بردن دانسیته محیط می شوند، شناخته شوند. واسطه باید کاملا" پایدار باشد که برای این منظور از جریان های داخلی سیال(به هم زدن سیستم) و یا حرکت ظرف می توان از ته نشینی واسطه جلوگیری نمود. خواص فیزیکی، کانی شناختی و شیمیایی ذرات تشکیل دهنده واسطه اثر قابل توجهی در عملیات دارند.

به عنوان مثال ابعاد و توزیع ابعادی، شکل، جرم مخصوص، انرژی سطحی، نفوذ پذیری از جمله خواص فیزیکی و هیدراتاسیون و اکسایش از جمله خواص شیمیایی ذرات تشکیل دهنده واسطه هستند. معمولا" بازیابی واسطه ابتدا با شستشوی شدید به وسیله آب در سطح سرند انجام می شود و سپس از جدا کننده های مغناطیسی برای بازیافت واسطه استفاده می شود. به طور کلی یکی از اهداف مهم در عملیات واسطه سنگین "دقت جدایش " است که به خواص هیدرودینامیکی ذرات تحت جدایش و محیط سنگین ایجاد شده بستگی دارد. در حالت کلی پایداری واسطه در روش های واسطه سنگین به مسائل زیر وابسته است:

۱. جرم مخصوص واسطه: با افزایش غلظت حجمی ذرات و کاهش ابعاد، پایداری واسطه افزایش می یابد و بدین ترتیب سرعت ته نشینی ذرات نیز کم می شود.

۲. نوع واسطه: محیط های سنگین بسته به جنس مواد و سرعت ته نشینی ذرات در آن، حالات مختلفی از پایداری را رقم خواهند زد.

۳. شکل ذرات تشکیل دهنده واسطه: برای جرم مخصوص مشخص، سرعت ته نشینی ذرات سوزنی کمتر از ذرات کروی است.

۴. ایجاد جریان های رو به بالای آب با سرعتی کمتر از سرعت ته نشینی ذرات تشکیل دهنده واسطه، تلاطم محیط در دستگاه های استاتیکی و اعمال نیروی گریز از مرکز در دستگاه های دینامیکی نیز از دیگر پارامتر های موثر در امر پایداری واسطه است.

٦-١- مایعات سنگین

انواع زیادی از مایعات آلی با دانسیته های مختلف برای این منظور وجود دارد که برخی از آن ها را در جدول ۳-۲ می بینید. با مخلوط کردن یک یا دو ماده آلی امتزاج پذیر با نسبت های مشخص می توان به هر دانسیته مورد نظری دست یافت. دقت استفاده از مایعات سنگین بسیار بالا بوده و با راندمانی بسیار خوب حتی در مورد مواد ریزدانه با چگالی های نزدیک به هم نیز کاربرد دارند. مایعات سنگین بسیار گران و اغلب سمی بوده و سریع بخار می شوند و محیط را آلوده می سازند. بنابراین استفاده صنعتی از آن ها نیز بسیار محدود است و بیشتر برای مطالعات آزمایشگاهی و امکان سنجی آرایش ثقلی یک ماده معدنی و یا تعیین کارائی یک روش و یا یک وسیله جدایش ثقلی به کار می روند.

جدول ۳-۲- برخی از مایعات سنگین متداول مورد استفاده در آزمایشگاه برای جداسازی

Liquid	*Chemical formula*	*Specific gravity*
Benzene	C_6H_6	0.80
Carbon tetrachloride	$C\ Cl_4$	1.58
Pentachloro ethane	$C\ Cl_2CH\ Cl_2$	1.67
Methylene Bromide	CH_2Br_2	2.48
Bromoform	$CH\ Br_3$	2.89
Tetrabromo ethane	$C_2H_2Br_4$	2.96
Methylene iodide	CH_2I_2	3.31
Thallous formate solution	H COOTl	3.39

٦-٢- نمک های محلول

نظریه استفاده از نمک های محلول در سال ۱۸۵۸ توسط بسمر (Bessemer) ارائه شد. برای این منظور کلرید های کلسیوم، باریوم، روی و بعضی نمک های دیگر پیشنهاد شد. از بین این نمک ها تنها از کلرید کلسیوم در مقیاس صنعتی استفاده شده است. هر چند با انحلال کلرید کلسیوم در آب می توان محلولی با چگالی تا 1350 kg/m3 نیز تهیه کرد اما میزان رایج تر آن تهیه محلولی با چگالی 1200 kg/m3 است. در این روش برای افزایش چگالی جدایش از جریان رو به بالای محلول استفاده می شود. به این ترتیب می توان چگالی موثر

جدایش را به 1400 تا 1600 kg/m3 رساند. دانه بندی مناسب مواد در این روش ۶ تا ۱۵۰ میلی متر است. لیکن در یک عملیات واحد، نسبت ابعاد بزرگترین قطعات به کوچکترین آن ها نباید از ۳ یا ۴ بیشتر باشد. در گذشته به طور رایج از محلول های کلرید کلسیوم و کلرید روی برای بررسی قابلیت شستشوی زغالسنگ در آزمایشگاه استفاده می شد. لیکن در حال حاضر بیشتر از هیدروکربن های هالوژنه (تحت نام تجاری Certigave) استفاده می شود.

٦-۳- واسطه های سنگین

با توجه به عدم امکان استفاده از مایعات سنگین و محدودیت های نمک های محلول در چگالی محلول تهیه شده، در عملیات صنعتی از محیطی متشکل از آب که در آن دانه های کوچک ماده ای با چگالی زیاد متفرق شده اند و به این ترتیب تشکیل یک سیال کاذب را داده است، استفاده می شود. چنین محیطی را "واسطه سنگین" می نامند. مواد موجود در جدول ۳-۳ متداولترین واسطه ها در صنعت فرآوری هستند.

جدول ۳-۳- برخی از متداول ترین کانی های مورد استفاده برای ساخت واسطه سنگین در صنعت

نوع ماده	جرم مخصوص(گرم بر سانتیمتر مکعب)	محدوده ابعادی (مش)	جرم مخصوص واسطه(گرم بر سانتیمتر مکعب)
شیل	۲-۲/۶	-	۱/۳
کوارتز	۲/۶۵	-۳۵+۱۰۰	۱/۳
باریت	۴/۵	-۲۰۰	۲
منیتیت	۵/۱۸	-۳۲۵	۳/۸
فروسیلیسیوم	۶/۸	-۶۵	۳/۴
گالن	۷/۸	-۶۵	۴/۵
پودر سرب	۱۱/۳۵	-	۶/۵

هر یک از این مواد در دستگاه خاصی به کار گرفته می شوند.

به طور کلی واسطه ها را از نظر محدوده جرم مخصوص و کاربرد به چهار دسته تقسیم می کنند:

۱ - واسطه هایی با چگالی 1.3 تا 1.8 در زغالشویی

۲ – واسطه هایی با چگالی 2.7 تا 2.9 برای پرعیار سازی اولیه کانسنگ های فلزی

۳ – واسطه هایی با چگالی 2.9 تا 3.6 برای پرعیار سازی موادی خاص مثل الماس

۴ – واسطه هایی با چگالی بیشتر از 3.6 که کمتر مورد استفاده قرار می گیرند.

در سال های ۱۹۳۰ تا ۱۹۴۰ از گالن به علت چگالی زیادی که دارد استفاده فراوانی می شد لیکن با توجه به تردی نسبی، قابلیت اکسیداسیون نسبتا سریع سطح آن و در نتیجه اشکال در بازیابی آن (به روش فلوتاسیون) به تدریج اهمیت خود را از دست داد. در حال حاضر رایج ترین مواد برای تهیه واسطه سنگین کوارتز، منیتیت و فروسیلیسیوم هستند. از ماسه های کوارتزی با دانه های گرد شده در آرایش زغالسنگ (روش چانس) استفاده می شود. لیکن با توجه به چگالی کوارتز، کاربرد آن تقریبا منحصر به همین ماده می گردد. مصرف کوارتز به ازای آرایش هر تن زغالسنگ تقریبا یک کیلوگرم است. واسطه هایی که تقریبا در همه جا رایج شده اند واسطه های مغناطیسی هستند. زیرا توسط این مواد می توان چگالی جدایش را از 1250 تا 3800 kg/m3 تنظیم کرد. به علاوه توسط یک دستگاه واحد امکان آرایش ماده ای با دانه بندی نسبتا وسیع وجود دارد. بازیابی آن ها ساده بوده میزان مصرف آن ها به ازای آرایش هر تن ماده معدنی حدود ۵۰۰ گرم می باشد. قیمت آن ها نیز نسبتا کم است.

٦-٤- جدا کننده های واسطه سنگین

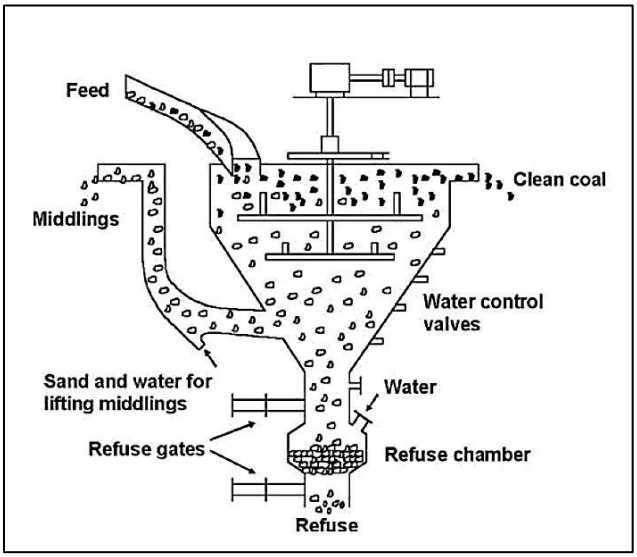
جدا کننده های واسطه سنگین در انواع متعدد ساخته شده و مورد استفاد قرار می گیرند. این جدا کننده ها را به طور کلی می توان به جدا کننده های ثقلی و جدا کننده های گریز از مرکز تقسیم کرد.

جدا کننده های ثقلی وسایلی هستند که بار اولیه به داخل آن ها که خود محتوی واسطه ی سنگین با چگالی مورد نظر می باشد، ریخته می شود. کانی های سبک تر از واسطه شناور می گردند و خود به خود با سر ریز شدن و یا به کمک پارو هایی آن ها را تخلیه می کنند. کانی های سنگین نیز غوطه ور می شوند. تخلیه ی این بخش از مواد دشوار ترین قسمت این جدا کننده ها است. در جدا کننده های گریز از مرکز، با ایجاد حرکت دورانی در محیط، مواد تحت نیروی گریز از مرکز قرار می گیرند که به مراتب بزرگتر از نیروی ثقل است. بدین ترتیب توسط این وسایل می توان مواد دانه ریز تری را به روش واسطه ی سنگین آرایش داد. توسط جدا کننده

های ثقلی موادی در ابعاد بزرگتر از ۱۳ میلیمتر را می توان آرایش داد، حال آنکه توسط جدا کننده های گریز از مرکز موادی در ابعاد بزرگتر از 1 یا 0.5 میلیمتر قابل آرایش هستند.

٦-٤-١- جدا کننده مخروطی چانس

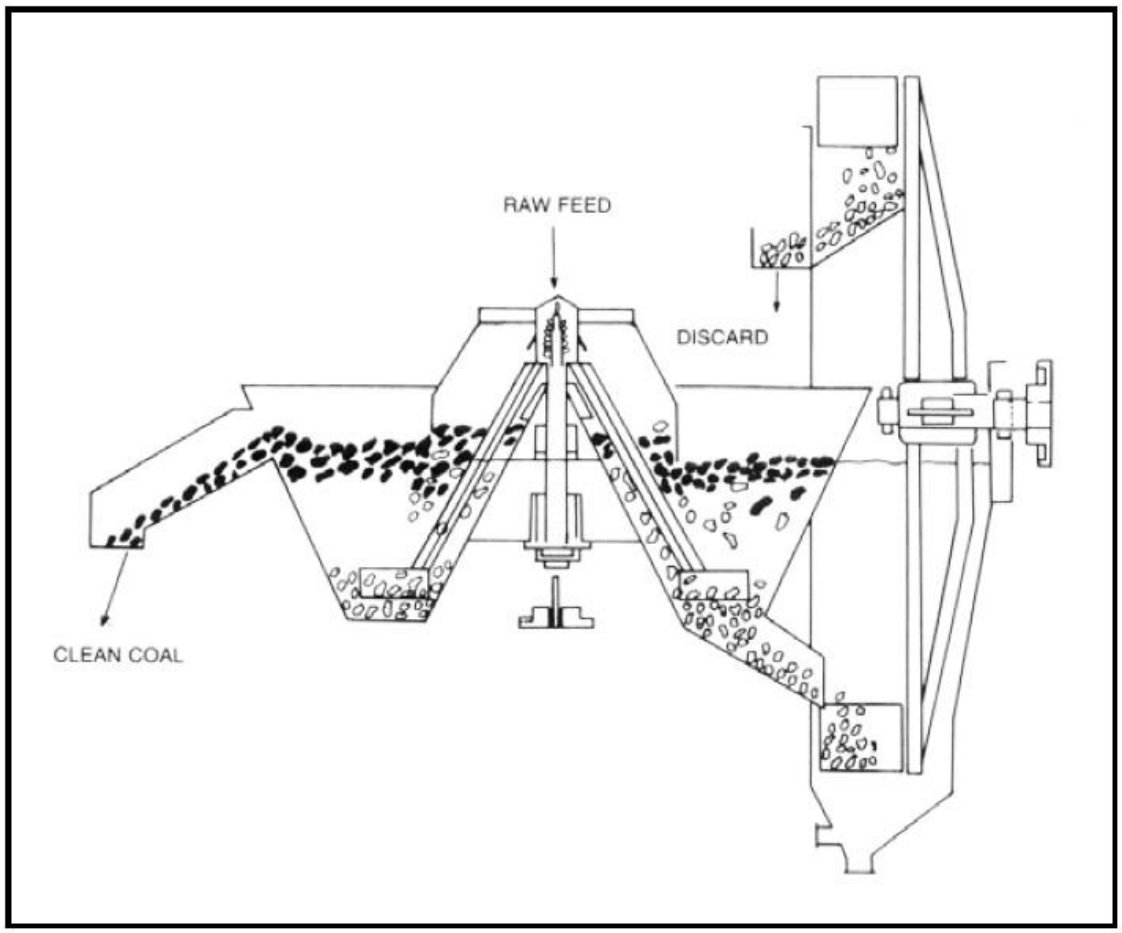
این جدا کننده مطابق شکل ۳-۵۱ از ظرفی مخروطی شکل تشکیل شده است که واسطه ی نسبتا پایداری متشکل از آب و ماسه سیلیسی به داخل آن جریان می یابد. زغالسنگ خام از بخش فوقانی وارد جدا کننده می شود. در جداره مخروط در سطوح مختلف مسیرهایی برای ورود آب پیش بینی شده است که کار آن را تا حدودی مشابه کلاسیفایرها می کند، لیکن شکل مخروط و نحوه ی وارد کرد آب به داخل آن به ترتیبی طراحی شده است که در داخل آن لایه منبسط شده ای از ماسه در بخش عمده ای از مخروط تشکیل می شود. قسمت اعظم آب از قسمت های فوقانی مخروط وارد شده، همراه با زغالسنگ سر ریز می شود، لذا تأثیری بر روی لایه منبسط شده ماسه ندارد. در داخل مخروط پره هایی توسط یک محور با سرعت کم دوران می کنند. این پره ها به سر ریز شدن زغالسنگ شناور شده کمک می کنند. برای تخلیه نا خالصی های غوطه ور شده نیز در پایین مخروط محفظه ای پیش بینی شده است که شامل دو دریچه است. این دریچه ها به طور خودکار به تناوب باز و بسته می شوند و بدین ترتیب ضمن جلوگیری از تغییر سطح پالپ در مخروط، باطله ته نشین شده، تخلیه می گردد.



شکل ۳-۵۱- جداکننده مخروطی چانس

٦-٤-٢- جدا کننده ی حلقوی (Norwalts)

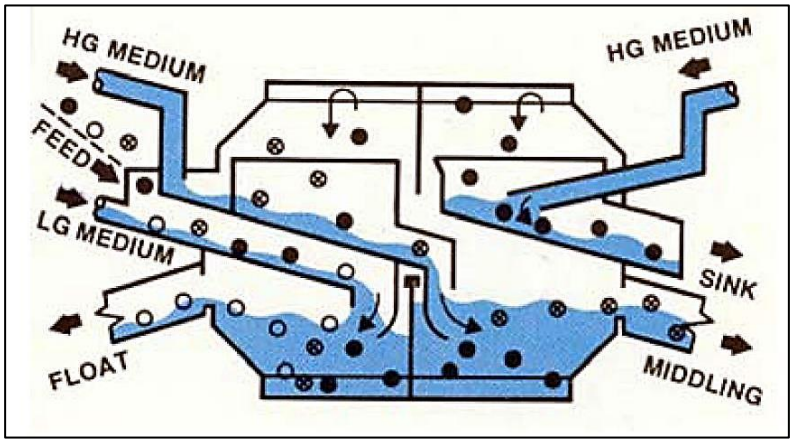
این جدا کننده مطابق شکل ۳-۵۲ از حوضچه ای حلقوی شکل تشکیل یافته است که در آن بازوهایی که مجهز به پره هایی هستند دوران می کنند و ضمن جلوگیری از ته نشین شدن واسطه، دانه های ماده معدنی را در محیط جابجا می کنند. بار اولیه از بخش مرکزی وارد حوضچه می شود. بخش شناور شده از یک طرف حوضچه سر ریز می شود. بخش غوطه ور شده توسط پره های دوار ، به سمت مجرایی در ته حوضچه هدایت شده، توسط بالا برهایی که ممکن است پیاله ای شکل یا به صورت گردونه باشند، به طور دائم تخلیه می گردد. از این جدا کننده عمدتا" برای آرایش زغالسنگ استفاده شده است.



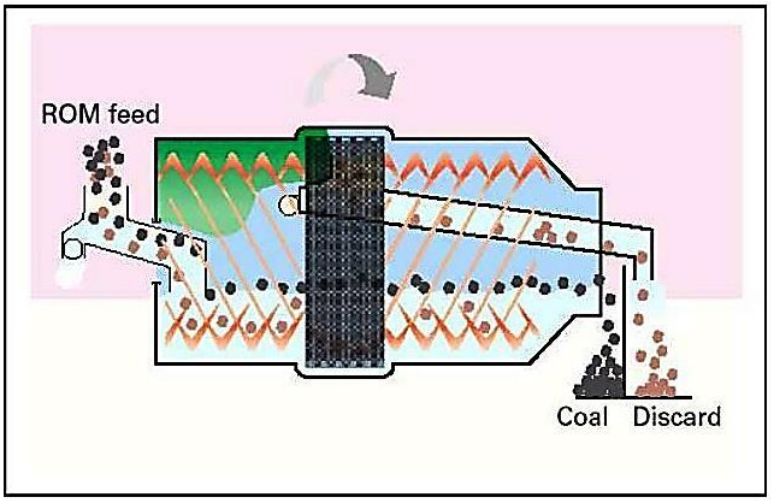
شکل ۳-۵۲- جداکننده حلقوی

٦-٤-٣- جداکننده استوانه ای ومکو (Wemco Drum Separator)

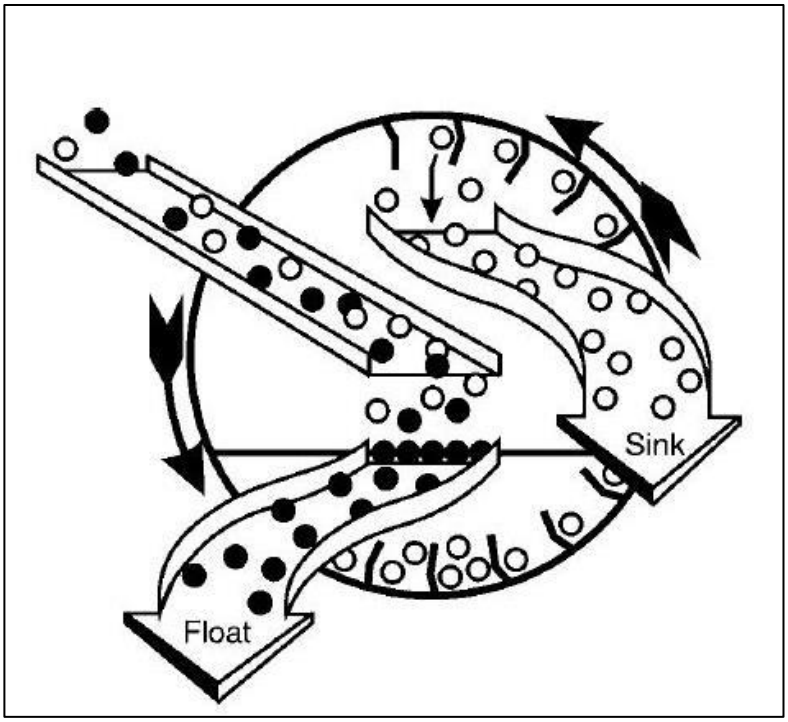
این دستگاه مطابق شکل های ۳-۵۳ و ۳-۵۴ از استوانه ای تشکیل شده است که حول محور افقی می چرخد. بار اولیه پس از ورود به دستگاه به دو بخش غرق و شناور تقسیم می شود. مواد شناور شده از سطح و مواد غرق شده نیز پس از حمل توسط بالابر هایی که داخل استوانه قرار دارد به داخل ناوی ریخته شده و از استوانه خارج می گردد. نحوه عملکرد این بالابر ها در شکل ۳-۵۵ نشان داده شده است. شکل ۳-۵۶ نیز یک نمونه صنعتی از این دستگاه را نشان می دهد.



شکل ۳-۵۳- نمایی از استوانه جداکننده ومکو



شکل ۳-۵۴- نمایی دیگر از استوانه جداکننده ومکو

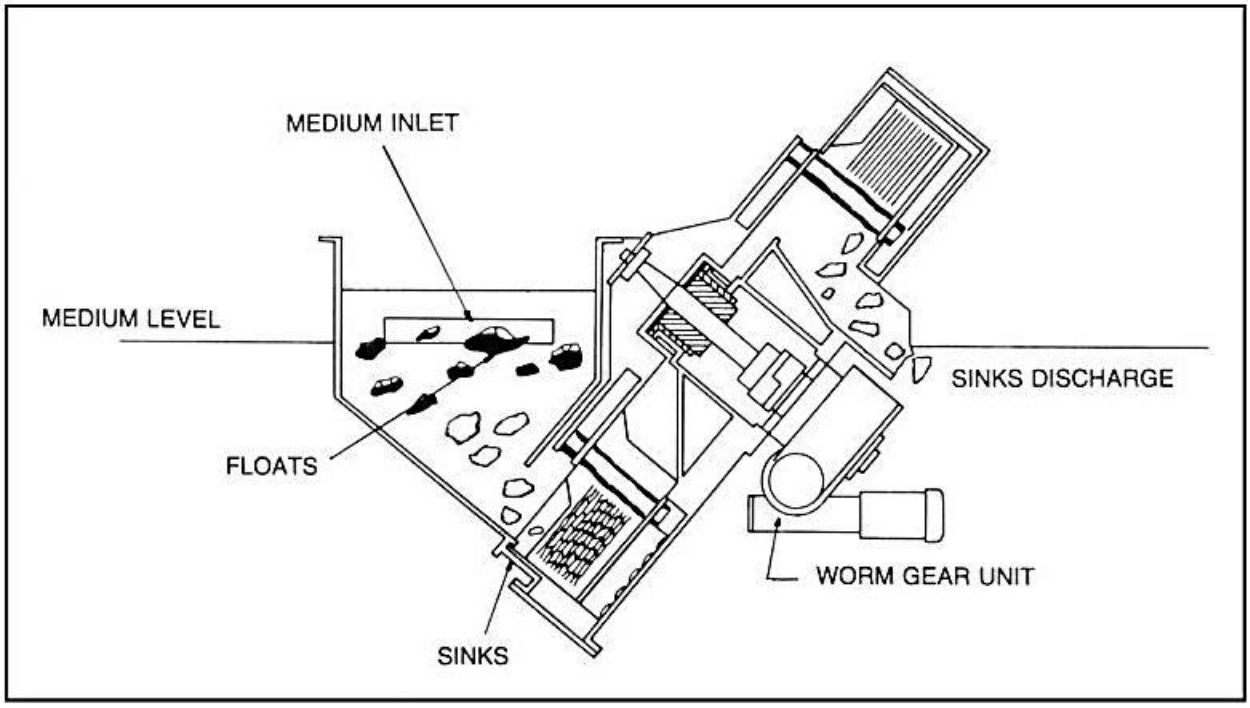


شکل ۳-۵۵- مکانیزم عملکرد بالابر ها در خارج کردن بخش غوطه ور در جداکننده ومکو

شکل ۳-۵۶- نمونه صنعتی از استوانه جداکننده ومکو

٦-٤-٤- جداکننده دریو بوی

به دلیل ظرفیت زیاد شناور سازی دستگاه، در کارخانه های زغالشویی انگلستان بیشتر استفاده می شود. واسطه سنگین از دو طریق یکی از کف دستگاه و دیگری همراه زغال وارد محفظه می شود و به کمک شیر مخصوص می توان دبی آن را (واسطه) کنترل کرد. بار از یک قسمت دستگاه وارد و از قسمت دیگر، محصول شناور خارج می گردد. بخش غرق شده نیز از بالا خارج می گردد. شمایی از این جدا کننده در شکل نشان داده شده است.



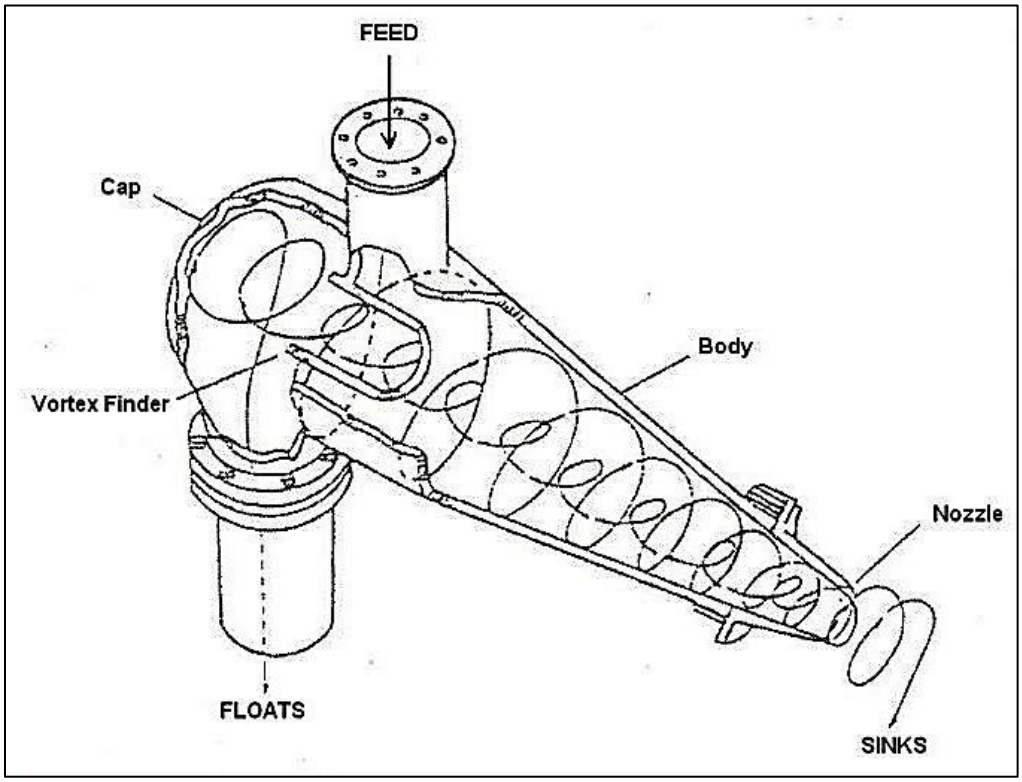
شکل ۳-۵۷- نمایی از جداکننده دریوبوی

شکل ۳-۵۸- یک نمونه صنعتی از جداکننده دریوبوی

شکل ۳-۵۹- جدا کننده دریو بوی در حال کار در زغالشویی

٦-٤-٥- سیکلون واسطه سنگین

این وسیله شباهت زیادی به هیدروسیکلون ها دارد و در اکثر مواقع به طور مایل و حتی معکوس نیز قرار می گیرد. واسطه منیتیتی و یا فرو سیلیسیوم به طور مماسی و از ارتفاع ۳ متری وارد سیکلون می شود. بخش غرق شده از ته ریز و بخش شناور شده از سرریز خارج می شود. نمایی از این وسیله در شکل ۳-۶۰ نشان داده شده است. شکل ۳-۶۱ نیز یک نمونه صنعتی از این دستگاه را نشان می دهد.

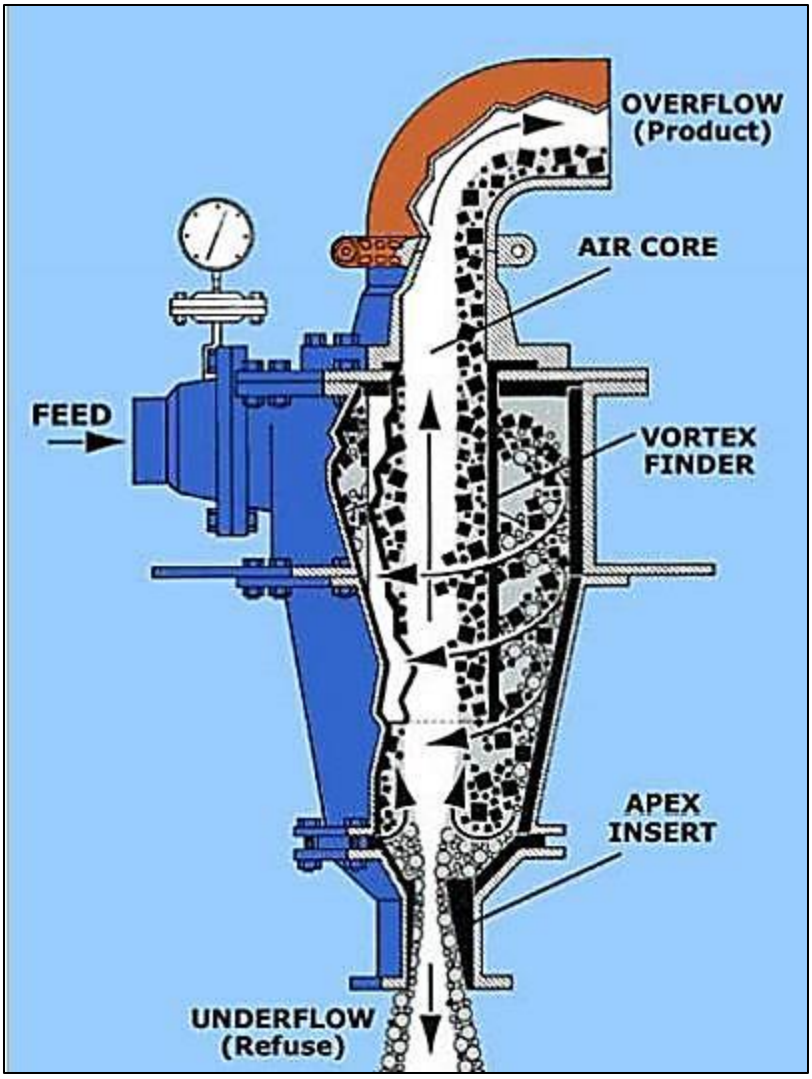


شکل ۳-۶۰- نمایی از یک سیکلون واسطه سنگین

شکل ۳-۶۱- نمونه ای از سیکلون واسطه سنگین

٦-٤-٦- سیکلون فقط آب

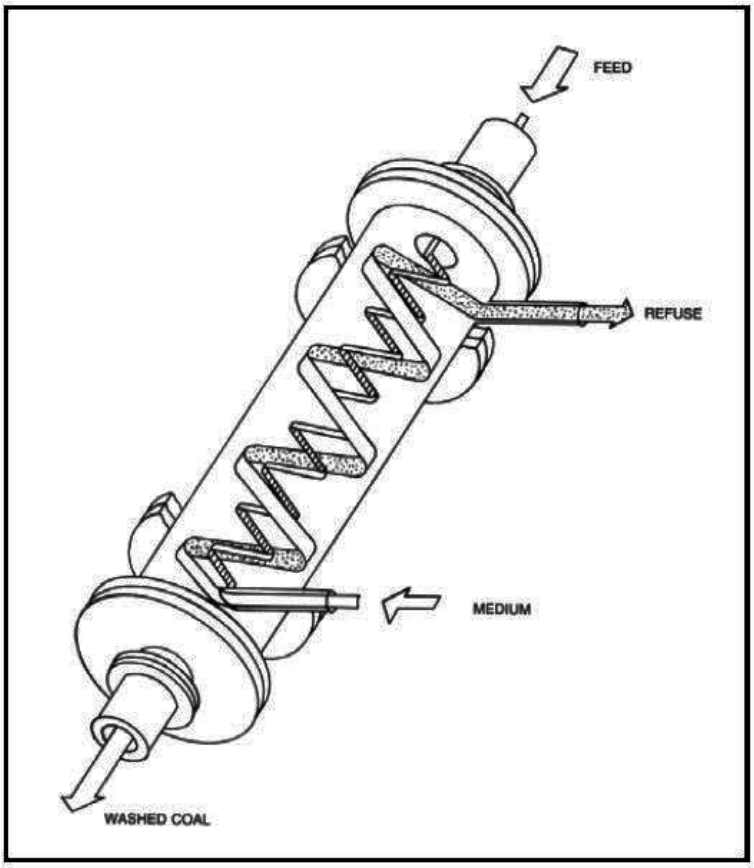
در این دستگاه ها زاویه مخروط تا ۱۲۱ درجه نیز می رسد قسمت استوانه ای این دستگاه بلنـد تـر از سـیکلون های معمولی است. زاویه زیاد در بخش مخروط باعث شده است که ذرات حد واسط از نظر ابعاد و وزن ضمن بار در گردش، یک واسطه سنگین را در محیط تشکیل دهند. یکی از مشخصه های این دستگاه طول زیاد سرریز بوده که با عث افزایش بازدهی جدایش می گردد. محصول شناور شده در این دستگاه نیاز به شستشوی مجـدد ندارد. شکل ۳-۶۲ نمایی از این دستگاه را نشان می دهد.



شکل ۳-۶۲- نمایی از یک سیکلون فقط آب

٦-٤-٧- جداکننده Dyna whirlpool

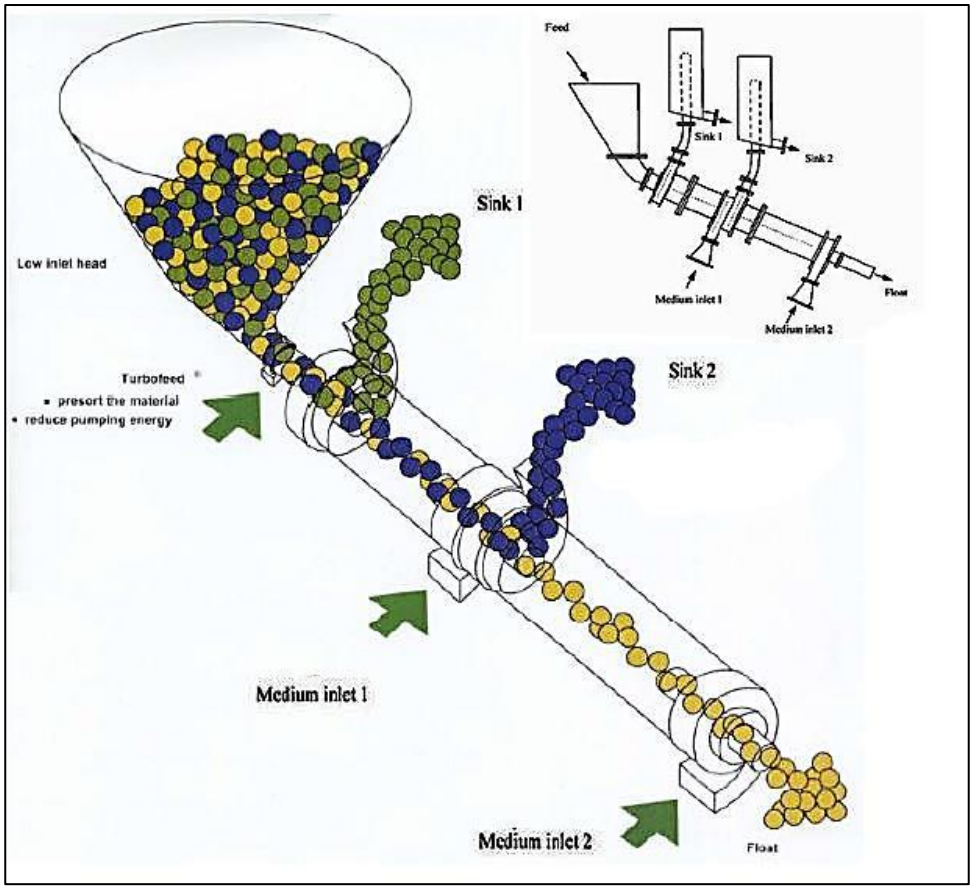
این دستگاه از استوانه ای تشکیل شده است که به طور مایل قرار می گیرد. بار اولیه از بخش فوقانی و واسطه سنگین نیز به صورت مماسی و تحت فشار از قسمت تحتانی دستگاه وارد آن می گردد. واسطه سنگین پس از ورود به دستگاه حرکتی مارپیچی از پایین به بالا به خود می گیرد و حرکت مارپیچی در جهت عکس حرکت اول و از بالا به پایین نیز به وجود می آید که از بخش تحتانی استوانه خارج می شود. بنا براین ذرات سبک در امتداد محور مرکزی از سرریز و بخش غرق شده از ته ریز آن خارج می گردد. شکل ۳-۶۳ نمایی از این دستگاه را نشان می دهد.



شکل ۳-۶۳- نمایی از یک جداکننده ***Dyna whirlpool***

٦-٤-٨- جدا کننده تری فلو (Tri – flo)

در این دستگاه بار اولیه از بخش فوقانی و واسطه از دو نقطه مجزا به آن وارد مـی شـوند. واسـطه سـنگین بـه صورت مماسی و با فشار وارد دستگاه شده و حرکت دورانی به خود می گیرد. بدین ترتیب ذرات غرق شده به طرف بالا و مواد حد واسط از مجرای اول و زغال از مجرای دوم در امتداد محور مرکـزی از انتهـای آن خـارج می شود. شکل ۳-۶۴ نمایی از این دستگاه را نشان می دهد. شکل ۳-۶۵ نیز نمونه صنعتی این دستگاه را نشان می دهد.

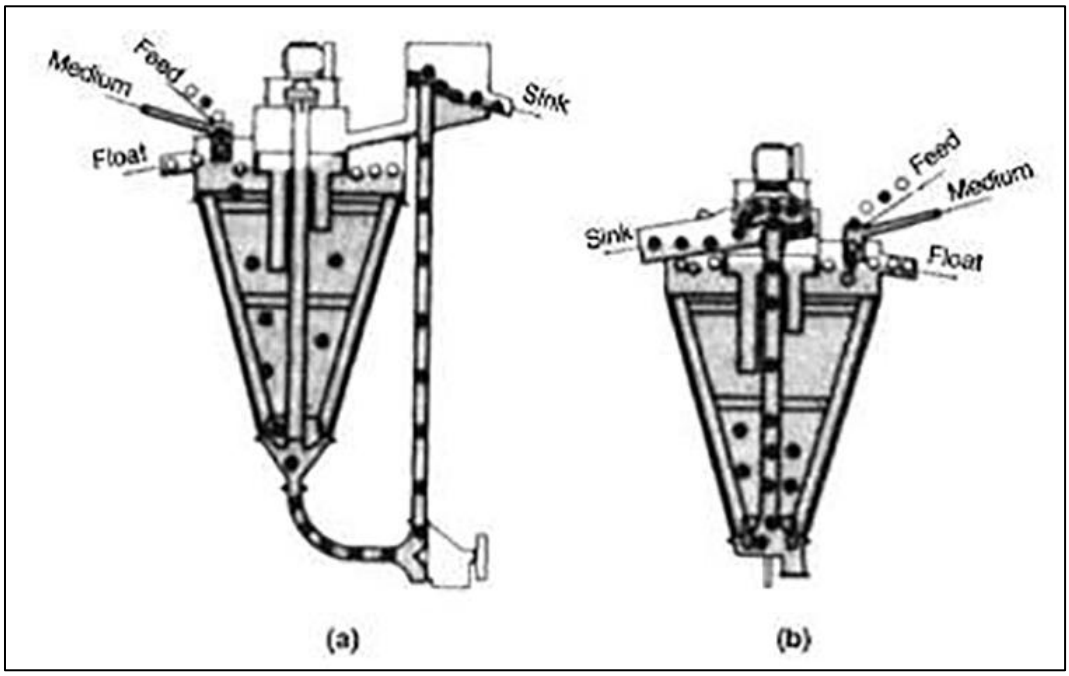


شکل ۳-۶۴- نمایی از طرز کار یک جدا کننده **Tri-Flo**

شکل ۳-۶۵- نمونه ای صنعتی از جداکننده **Tri-Flo**

٦-٤-٩- جداکننده مخروطی ومکو

جدا کننده مخروطی ومکو با توجه به ظرفیت تخلیه نسبتا زیاد مواد غوطه ور شده در آن، به طور وسیعی بـرای آرایش کانه های فلزی استفاده می شود. این مخروط که قطر قاعده آن در بعضی از انواع به ۶ متر می رسد، قادر است موادی با ابعاد ۶ تا ۲۵۰ میلیمتر را آرایش دهد. ظرفیت چنین جدا کننـده ای حـدود ۵۰۰ تـن در سـاعت است. در امتداد محور این جداکننده همزنی قرار گرفته است که با سرعت آرامی دوران کرده، از ته نشین شـدن واسطه جلوگیری می کند. بار اولیه از طریق یک ناو بر روی سطح واسطه ریختـه مـی شـود و تـا حـدود چنـد سانتی متر در داخل آن فرو می رود. بخش شناور شده به سادگی از یک لبه ظرف سرریز شده توسط پمـپ یـا به کمک هوای فشرده خارج می شود. شکل ۳-۶۶ نمایی از این دستگاه را نشان می دهد.

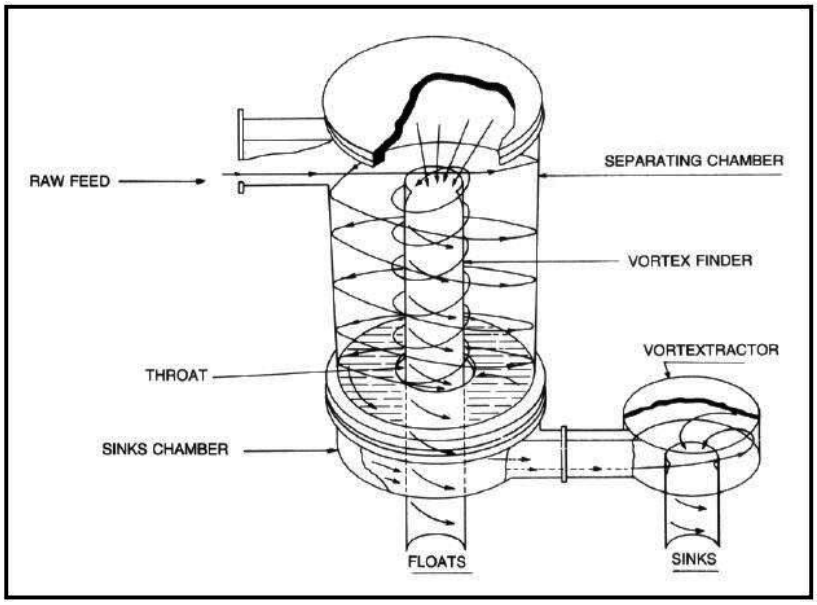


شکل ۳-۶۶- جداکننده مخروطی ومکو

٦-٤-١٠- جداکننده Vorsyl

جداکننده Vorsyl نیز مواد را تحت نیروی گریز از مرکز در محیطی متشکل از واسطه سنگین از یکدیگر جـدا می کند. این جداکننده مطابق شکل از ظرفی استوانه ای شکل به قطر ۶۰ سانتی متر تشکیل شده است. بار اولیه همراه با واسطه سنگین از طریق لوله ای که به قسمت فوقانی ظرف به طور مماسی متصـل شـده اسـت، تحـت

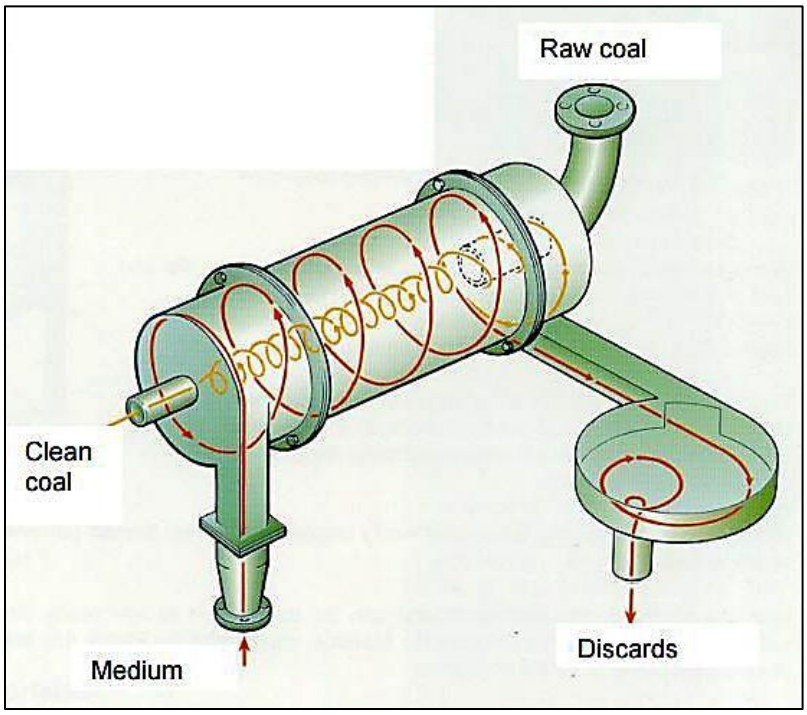
فشار وارد می شود. دانه هایی که دارای چگالی کمتر از واسطه باشند، از طریق لوله ای که از پایین استوانه و در امتداد محور آن نصب شده است (لوله سرریز) خارج می گردند. دانه هایی که چگالی آن ها نزدیک به واسطه و یا بزرگتر از آن است تحت نیروی گریز از مرکز به سمت جداره ظرف متمایل می شوند و با حرکتی مارپیچ مانند پایین می روند. در اطراف لوله سرریز، گلوگاه حلقه ای شکل پیش بینی شده است. دانه های مخلوط و سنگین همراه با بخشی از واسطه حین عبور از این گلوگاه تحت نیروی گریز از مرکز شدیدی قرار می گیرند و به این ترتیب جدایش دقیق تری در این مرحله انجام می گیرد. در قسمت تحتانی ظرف محفظه ای با ارتفاع کم وجود دارد که ته ریز جداکننده وارد آن شده، از طریق لوله ای جانبی به طور مماسی خارج و به محفظه کم ارتفاع دیگری وارد می شود که نقش مانعی برای ته ریز را ایفا می کند. این محفظه از استوانه ای تشکیل گردیده است که مواد به طور مماسی وارد آن شده، از لوله ای در امتداد محور خارج می گردند. به این ترتیب یک جریان مارپیچی به سمت داخل در آن تشکیل می شود که با فشار ناشی از ورود مواد به این محفظه مقابله می کند. لذا می توان برای خروج مواد، از لوله ای با قطر زیاد استفاده کرد، بدون آن که واسطه زیادی از آن عبور کند. از جداکننده Vorsyl در بسیاری از کارخانجات زغال شویی برای آرایش زغالسنگ با ابعاد بین 0.5 تا 30 میلی متر استفاده شده است. شکل ۳-۶۷ نمایی از این دستگاه را نشان می دهد.



شکل ۳-۶۷- جداکننده Vorsyl

٦-٤-١١- جدا کننده لارکادم (Larcodems Separator)

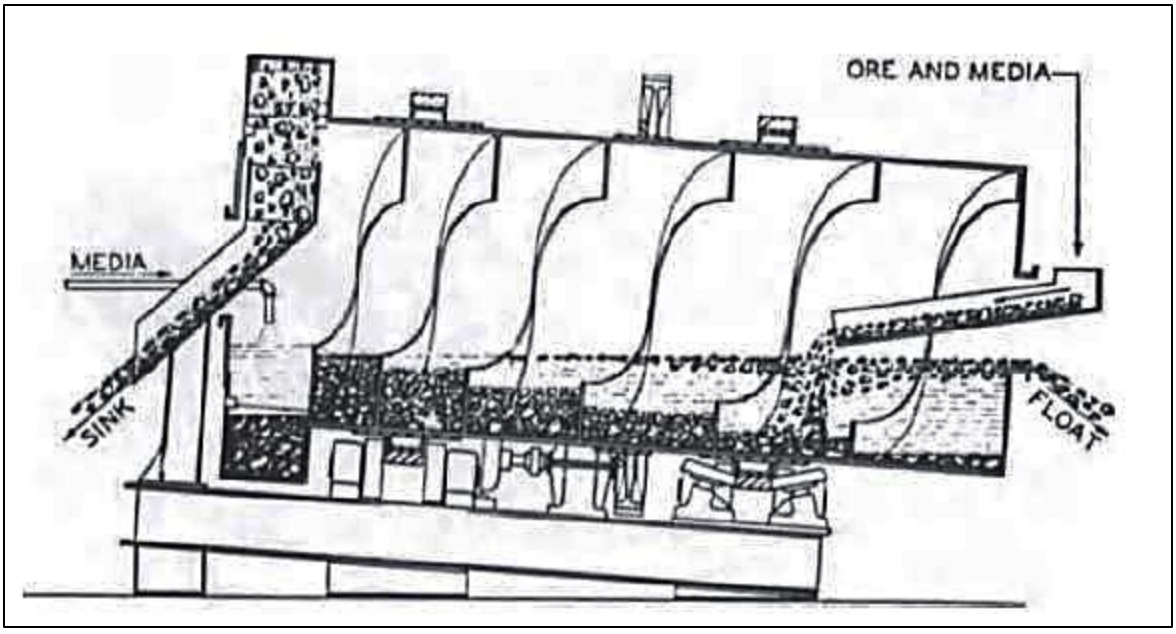
این دستگاه پیشرفته ترین نوع دستگاه های گریز از مرکز است که برای شستشوی زغالسنگ کاربرد وسیعی دارد. در این دستگاه باطله مرحله اول مجددا به استوانه دوم منتقل می شود و پس از شستشو می توان یک محصول حد واسط و یک باطله نهایی تولید کرد. از این نوع دستگاه ها با قطر 1.2 و طول 3 متر و با ظرفیت 250 تن در ساعت در کارخانه های زغال شویی استفاده می شود. به نظر می رسد با پیشرفت این دستگاه، شستشوی زغالسنگ در مقایسه با دیگر روش های ثقلی و جیگ بوم، با این دستگاه بهتر انجام می گیرد. شکل ۳-۶۸ نمایی از این دستگاه را نشان می دهد.



شکل ۳-۶۸- جداکننده ***Larcodem***

٦-٤-١٢- جدا کننده استوانه ای هاردینگ

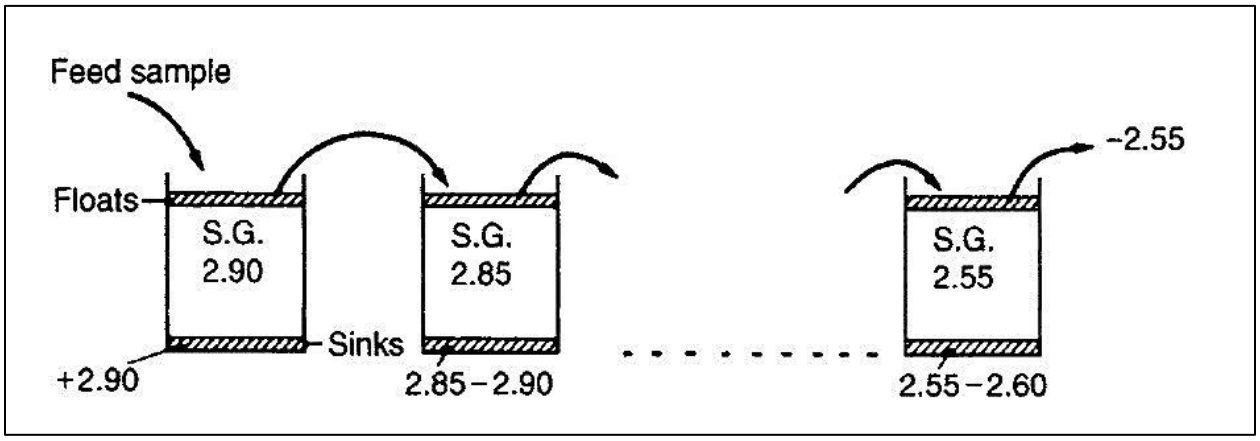
همانند استوانه جداکننده ومکو است. در این جدا کننده جهت جریان خوراک و جریان واسطه خلاف یکدیگر بوده و قسمت غوطه ور توسط مارپیچی از کف استوانه به سمت بالا منتقل شده و از آن جا خارج می شود. قسمت شناور نیز از پایین استوانه خارج می شود. شکل ۳-۶۹- نمایی از این جدا کننده را نشان می دهد.



شکل ۳-۶۹- استوانه جداکننده مختلف الجهت هاردینگ

٦-٥- بررسی های آزمایشگاهی توسط مایعات سنگین و کاربردهای آن

از مایعات سنگین در آزمایشگاه به منظور بررسی قابلیت پر عیار کردن یک سنگ معدنی به روش های ثقلی و تعیین چگالی واسطه سنگین در عملیات صنعتی استفاده می شود. برای انجام آزمایش، با انحلال مایع سنگین در حلال آن، یک سری محلول با چگالی های مختلف در حد فاصل چگالی کانی با ارزش و گانگ آن تهیه می گردد. نمونه سنگ معدنی مطابق شکل ۳-۷۰ به داخل ظرف محتوی سنگین ترین مایع ریخته می شود.



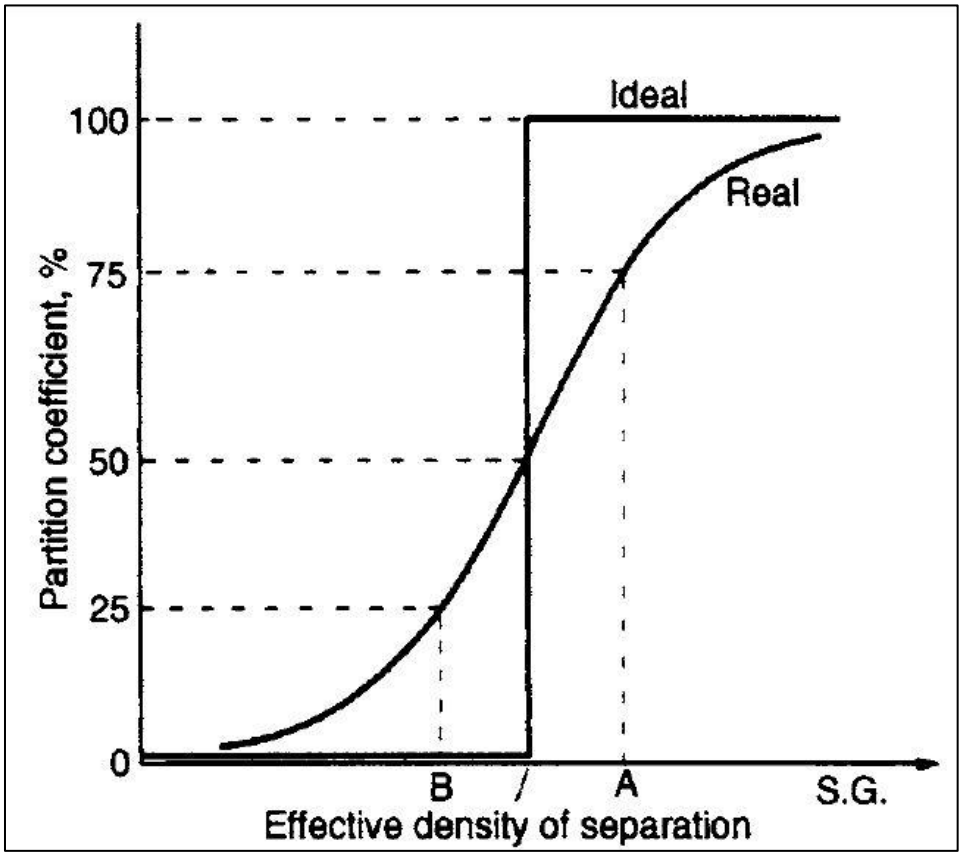
شکل ۳-۷۰- آزمایش مایعات سنگین

بخش شناور شده پس از شستشو به داخل ظرف بعدی محتوی مایع سبک تر منتقل می شود و عملیات به همین ترتیب تا ظرف محتوی سبک ترین مایع ادامه پیدا می کند. سپس محصول های غوطه ور شده و همچنین شناور شده نهایی به طور جداگانه آب کش شده پس از شستشو خشک می شود. با تعیین وزن هر یک از بخش ها می توان توزیع چگالی را در سنگ معدنی بدست آورد و با تعیین عیار هر بخش نیز توزیع عیار به دست می آید. در مورد مواد معدنی دانه ریز با توجه به سرعت جابجایی کمتر دانه ها، لازم است زمان کافی برای جدایش دانه ها در نظر گرفته شود. برای تسریع کار می توان از دستگاه های سانتریفیوژ استفاده کرد، ولی در این حالت نیز باید دقت شود که دانه های شناور شده تحت نیروی گریز از مرکز با دانه های غوطه ور شده مخلوط نشوند.

٦-٦- بازدهی جدایش توسط واسطه سنگین

آزمایش های انجام شده توسط مایعات سنگین را می توان جدایش کاملی فرض کرد. در حقیقت در این آزمایش ها، شرایط کار نزدیک به شرایط ایده آل هستند. زیرا دانه های ماده معدنی، زمان کافی برای ته نشین شدن را در اختیار دارند. زمانی که یک ماده معدنی در ظرف محتوی مایع سنگین ریخته می شود، دانه هایی که چگالی آن ها بیشتر از مایع است به سرعت غوطه ور می گردند و دانه هایی که چگالی آن ها کمتر از مایع است، به سمت بالا حرکت می کنند و شناور می شوند. با وجود این دانه هایی که چگالی آن ها نزدیک به چگالی مایع است به کندی حرکت می کنند و چنانچه چگالی آن ها تقریبا معادل محیط باشد، به طور معلق باقی می مانند. در جدایش صنعتی مواد معدنی توسط واسطه سنگین که بخش های شناور شده و غوطه ور شده پیوسته تخلیه می شوند، ممکن است دانه های با چگالی نزدیک به حد جدایش، زمان کافی برای شناور شدن یا غوطه ور شدن را نداشته باشند و وارد بخش دیگری شوند. دانه هایی که دارای چگالی تقریبا معادل واسطه هستند، احتمال ورودشان به بخش های غوطه ور شده یا شناور شده یکسان است. لذا بسته به این که تمام دانه ها به طور صحیح طبقه بندی شوند و یا چگالی آن ها خیلی نزدیک به واسطه باشد، به طور یکسان بین دو بخش تقسیم گردند، بازدهی عملیات بین ۱۰۰٪ و ۵۰٪ تغییر می کند. بنابراین سادگی یا پیچیدگی عملیات جدا کردن، به مقدار موادی که دارای چگالی نزدیک به حد جدایش هستند، بستگی دارد. در نتیجه بازدهی یک جداکننده خاص نیز وابسته به قابلیت آن برای جدایش مواد با چگالی نزدیک به حد جدایش است. بازده

جدایش را می توان از روی شیب منحنی توزیع (یا منحنی tromp) به دست آورد. این شیب تعیین کننده بازدهی یک جداکننده بدون توجه به کیفیت بار اولیه است و می توان از آن برای مقایسه جداکننده ها و پیش بینی جداکننده مناسب استفاده کرد.



شکل ۳-۷۱- منحنی توزیع یا tromp

درصدی از بار اولیه با چگالی مشخصی را که به بخش غوطه ور شده منتقل شده است، ضریب توزیع می نامند. منحنی تغییرات ضریب توزیع نسبت به چگالی، منحنی توزیع یا منحنی tromp نام دارد. از روی منحنی ایده آل توزیع، مشاهده می شود که تمام دانه هایی که چگالی آن ها بیشتر از حد جدایش است به بخش غوطه ور شده و تمام دانه هایی که چگالی آن ها کمتر از حد جدایش است به بخش شناور شده منتقل شده اند. در عمل (منحنی حقیقی توزیع) بازدهی عملیات برای دانه هایی با اختلاف چگالی زیاد نسبت به حد جدایش دارای بیشترین مقدار است و با نزدیک شدن چگالی دانه ها به حد جدایش، بازدهی کاهش می یابد. تقریبا تمام منحنی های توزیع در فاصله ضرایب توزیع ۲۵٪ و ۷۵٪ به صورت خط مستقیم هستند و لذا از شیب این خط

می توان برای نشان دادن بازدهی استفاده کرد. نصف تفاوت بین چگالی های دانه هایی که ضرایب توزیعشان به ترتیب ۷۵٪ و ۲۵٪ است، خطای احتمالی جدایش یا "پراش ممکن" (E_p) نامیده می شود. مقدار آن از روی شکل برابر است با

$$E_p = \frac{A - B}{2 \times 1000}$$

چگالی دانه هایی که ضریب توزیعشان ۵۰٪ است (دانه هایی که ۵۰٪ آن ها به بخش غوطه ور شده و ۵۰٪ آن ها به بخش شناور شده می روند) به عنوان چگالی موثر جدایش شناخته می شود. این مقدار ممکن است با چگالی محیط متفاوت باشد. قسمت خطی منحنی توزیع در فاصله ضرایب توزیع ۷۵٪ و ۲۵٪ هر چه به خط قائم نزدیک تر باشد، مقدار E_p کوچکتر بوده و بازدهی جدایش بیشتر است. در یک جدایش ایده آل، این خط قائم بوده و مقدار E_p برابر صفر است. در عمل مقدار E_p معمولا بین 0.02 و 0.08 تغییرمی کند. از E_p معمولا برای تعیین بازدهی جدایش در وسائلی از قبیل میز، مارپیچ، مخروط و غیره استفاده نمی شود. زیرا در این وسائل پارامترهای متعددی از قبیل شیب بستر، میزان آب شستشو، سرعت و غیره بر روی بازدهی تاثیرمی گذارند. کاربرد عمده آن در روش واسطه سنگین است. زیرا این روش نسبتا ساده و قابل کنترل دقیق است.

مسائل فصل

تمرین۱- دانسیته پالپ ۷۰٪ از ذرات منیتیت (دانسیته5.2 g/cm3) در آب را محاسبه نمایید.

جواب

$$d = \frac{m_s + m_l}{V_s + V_l} = \frac{70 + 30}{\frac{70}{5.2} + \frac{30}{1}} = 2.3\ g/cm^3$$

تمرین ۲- هر گاه به ۱۰۰۰ لیتر آب ۱۰۰ لیتر منیتیت (دانسیته5.2 g/cm3) و ۱۰۰ لیتر گالن (دانسیته 7.5 g/cm3) اضافه کنیم دانسیته واسطه سنگین بدست آمده کدام است.

جواب

$$d = \frac{1000 \times 1 + 100 \times 5.2 + 100 \times 7.5}{1000 + 100 + 100} = 1.89\ g/cm^3$$

تمرین۳- روش جداسازی ثقلی برای جدایش کدام یک از مخلوط کانه های زیر مناسب تر است؟ محدوده ابعادی مناسب برای هر یک را بدست آورید. (سیال مورد استفاده آب است)

الف- جدایش کرومیت (d=4.6 g/cm3) از گانگ سیلیسی (d=2.6 g/cm3)

ب- جدایش زغالسنگ (d=1.3 g/cm3) از شیل (d=2.4 g/cm3)

ج- جدایش گالن (d=7.5 g/cm3) از گانگ دولومیتی (d=2.9 g/cm3)

جواب

معیار پر عیار کنی را برای هریک از حالت ها حساب می کنیم:

الف:

$$CC = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} = \frac{4.6 - 1}{2.6 - 1} = 2.25$$

ب:

$$CC = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} = \frac{2.4 - 1}{1.3 - 1} = 4.67$$

ج:

$$CC = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} = \frac{7.5 - 1}{2.9 - 1} = 3.42$$

از اعداد بالا مشخص می شود که بهترین نتیجه از جدا سازی ثقلی را می توان برای مورد ب پیش بینی کرد و موارد ج و الف به ترتیب در اولویت های بعدی خواهند بود. همچنین با استفاده از جدول ۳-۱ می توان محدوده ابعادی مناسب برای مورد الف را بیشتر از ۱۰۰ مش و برای ب و ج بیشتر از ۷۵ مش تعیین نمود.

فصل چهارم

جداسازی الکتریکی

۱- مقدمه

با استفاده از نیروهای ناشی از باردار شدن یا پولاریزه شدن ذرات جامد در یک میدان الکتریکی، می توان مـواد معدنی را آرایش داد. در این روش ها با تنظیم نیروهای الکتریکی و نیروهای جنبی مانند نیرو های ثقل و نیروی گریز از مرکز، ذرات مسیر های مختلفی را طی کرده و بدین ترتیب می توان آن هـا را از یکـدیگر جـدا نمـود. چنانچه جدایش ذرات در هوا انجام گیرد به آن جدایش الکترواستاتیکی گفته می شود و در صورتی که از تخلیه کرونا استفاده شود به آن جدایش الکتریکی گفته می شود. روش های جدایش در آب کاربرد صنعتی نداشـته و در اینجا از ذکر آن ها خودداری می گردد. لازم به تذکر است که روش های جدایش الکترواستاتیکی علاوه بـر آرایش کانی هایی مانند ایلمنیت، روتیل، زیرکن، آپاتیت، هماتیت و بسیاری از کانی های دیگر، در سـایر زمینـه ها نیز از قبیل تصفیه مواد غذایی (جدا کردن کاه و فضله جانوران از غلات) . طبقه بندی الکترواستاتیکی دانه ها از نظر ابعاد یا شکل کاربرد دارد.

۲- ساختمان جدا کننده های الکترواستاتیکی

همه جدا کننده های الکترواستاتیکی حداقل شامل چهار بخش زیر هستند:

الف- مکانیزم باردار کردن – بی بار کردن

در نتیجه مکانیزم بار دار کردن بی بار کردن، توزیع بار به صورت های مختلفی پدید می آیـد. چنانچـه دو نـوع مختلف از دانه ها در ناحیه جداسازی وارد میدان الکتریکـی شـوند، هـر دو نـوع ممکـن اسـت دارای بارهـای الکتریکی با علامت مشابه شوند، یا تنها یکی از آن دو نـوع دارای بـار الکتریکـی قابـل ملاحظـه ای گـردد، یـا علامت بار الکتریکی در آن ها مخالف یکدیگر باشد و یا سرانجام این دو نوع دانـه هـا ی مختلـف در هنگـام ورود به ناحیه جداسازی دارای ممان های دی پل متفاوت باشند.

ب- میدان الکتریکی خارجی

این میدان شامل محیطی با پتانسیل یکسان و الکترودی با ولتاژ زیاد است. اختلاف پتانسیل امکان دارد از ۱۰ تـا ۱۰۰ کیلو ولت تغییر کند و معمولا از نوع یکسو است. میدان های الکتریکی ایجـاد شـده از حـدود 4×10^5 ولت بر متر تا حد شکستن مقاومت هوا (3×10^6) ولت بر متر تغییر می کند.

ج- تنظیم کننده مسیر دانه های غیر الکتریکی

جدایش فیزیکی دو نوع دانه، همواره با تنظیم نیروهای وارد شده بر دانه ها و مدت زمان تاثیر هر یک از نیروها انجام می شود، به نحوی که دانه های مختلف در زمان از قبل تعیین شده مسیرهای مختلف را طی می کنند. نیروهای وارد شده، علاوه بر نیروهای الکتریکی، معمولا شامل نیروهای ثقل، گریز از مرکز و اصطکاک نیز می شود.

د- سیستم های باردهی و جمع آوری محصول

همه جداکننده ها دارای وسیله ای برای انتقال بار اولیه به ناحیه جداسازی و روشی برای جدا کردن جریان دانه ها، در نقطه مورد نظر هستند، به صورتی که دانه های مختلف را بتوان جمع آوری کرد و به مرحله بعدی جدایش یا به سیلوی نهایی انتقال داد.

۳- مکانیزم های باردار کردن

هرچند به طرق مختلف می توان دانه های جامد را دارای بار الکتریکی نمود، لیکن تنها سه مکانیزم برای جدایش الکترواستاتیکی در مقیاس صنعتی قابل استفاده است.

الف- باردار کردن توسط تماس و مالش

ب- باردار کردن با بمباران یونی یا الکترونیکی

ج- باردار کردن با القا هدایتی

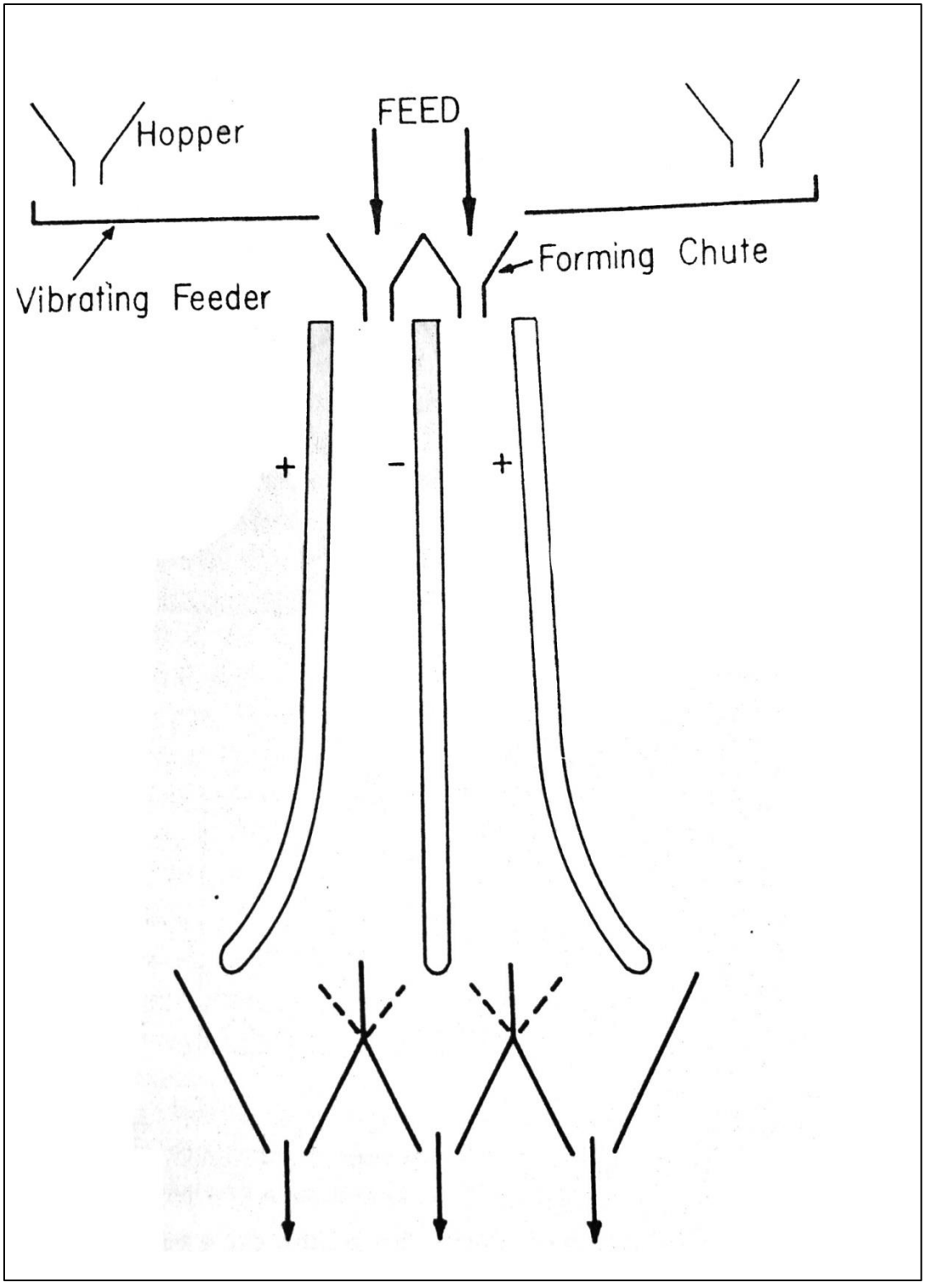
لازم به تذکر است که در عمل هرچند تنها یکی از مکانیزم های فوق دارای اثر عمده است، با وجود این بیش از یکی از آن ها بر روی باردار شدن دانه ها تاثیر می گذارد. اختلاف جداکننده های الکتریکی به طور عمده در مکانیزم مورد استفاده برای باردار کردن دانه ها است.

۳-۱- بار دار کردن توسط مالش و تماس

باردار کرد توسط تماس و مالش مکانیزمی است که برای باردار کردن انتخابی و جدایش الکترو استاتیکی مواد دی الکتریک بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. مثال های نمونه، جدایش فلدسپات از کوارتز، کوارتز از آپاتیت و نمک طعام از سیلوین می باشد. این امر بدین معنی نیست که اجسام هادی در اثر تماس و مالش باردار نمی شوند. این مواد معمولا باردار می گردند، لیکن به دلیل خاصیت هدایت الکتریکی زیاد قبل از آنکه بتوان این بار را در ناحیه جداسازی مورد استفاده قرار داد آنرا تخلیه می کنند.

بدیهی است که وقتی دو سطح تماس از یکدیگر جدا گردد، هریک از آن ها دارای باری مساوی ولی با علامت مختلف سطح دیگر می شود. تئوری باردار شدن در اثر تماس خیلی پیچیده بوده و هنوز به طور کامل شناخته شده نیست. چگالی بار ماکزیممی که می تواند در هوا پایدار باشد در حدود 27×10^{-6} کولن بر متر مربع است. با وجود این با توجه به این که عملیات باردار شدن محدود به سطحی می شود که در تماس قرار گرفته است و سطوح خارجی دانه های کانی ها معمولا خیلی نامنظم هستند. چگالی بار متوسط سطحی در بهترین حالت حتی با تماس های مکرر در حدود ۵٪ مقدار تئوری است.

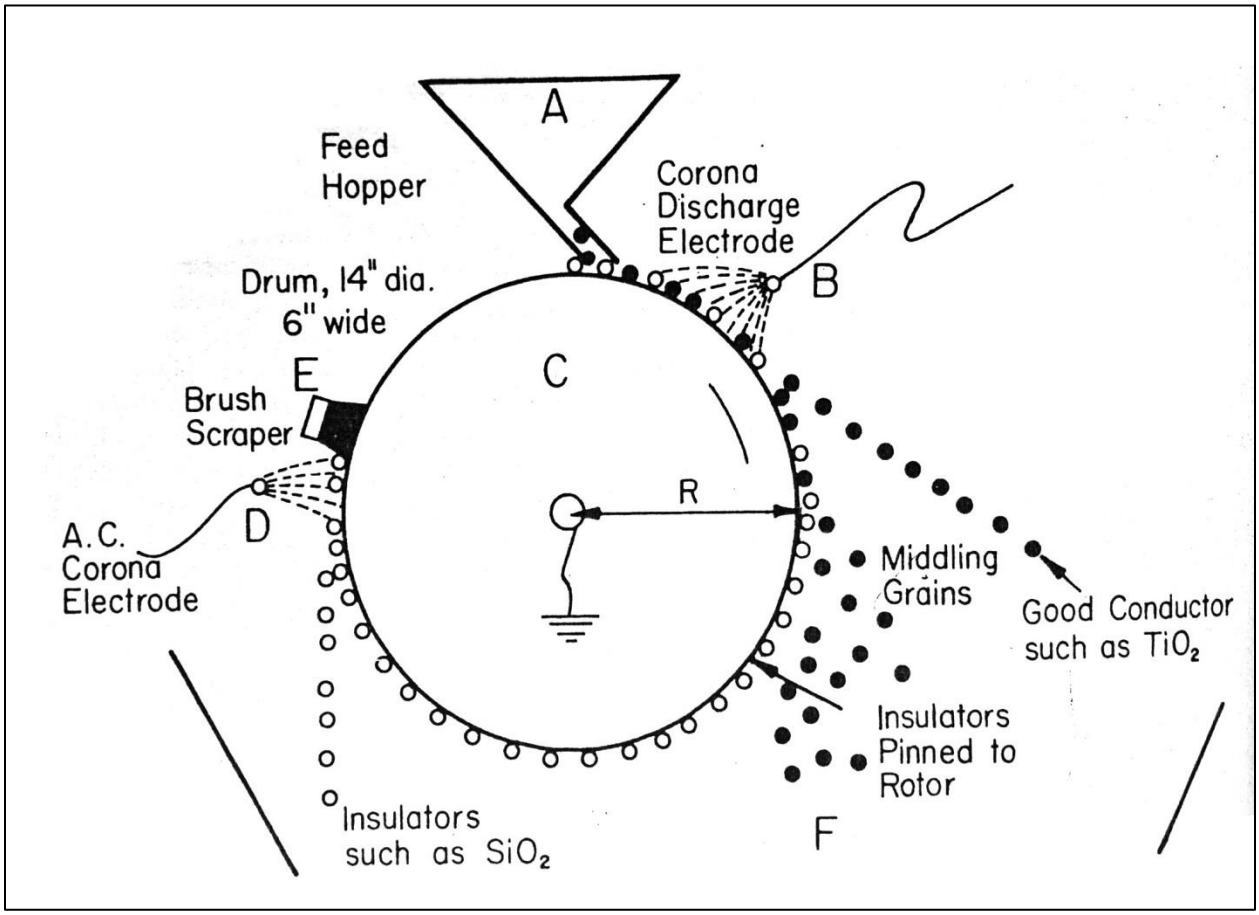
شکل ۴-۱ طرز کار یک جدا کننده الکترواستاتیکی با سقوط آزاد را نشان می دهد.



شکل ۴-۱- طرز کار یک جدا کننده الکترواستاتیکی با سقوط آزاد

۳-۲- باردار کردن با بمباران یونی یا الکترونی (تخلیه کرونا)– جدا کننده جریان فشار قوی

هرگاه کانی های تشکیل دهنده یک ماده معدنی، بخشی دارای هدایت الکتریکی زیاد و بخشی دارای هدایت الکتریکی کم باشد، این کانی ها را می توان با استفاده از جدایش الکتریکی از یکدیگر جدا نمود. جدایش روتیل از زیرکن و سایر کانی های نارسانای موجود در ماسه های ساحلی و جدا کردن کوارتز از اسپکولاریت از نمونه این فرآیند است. در این روش ذرات جامد از فضای تخلیه کرونا عبور داده می شوند. تخلیه کرونا از یک سیم نازک یا شانه فلزی تشکیل شده که به موازات یک روتور قرار گرفته است و دارای طولی معادل آن است. روتور این دستگاه از جنس فولاد نرم بوده که از نظر الکتریکی با زمین اتصال دارد. هرگاه فشار الکتریکی سیم یا شانه تا حدی افزایش داده شود که بر مقاومت محیط اطراف غلبه کند، تخلیه کرونا ایجاد می شود(شکل۴-۲).



شکل ۴-۲- جدا کننده فشار قوی

دانه های جامد از طریق دهانه A بر روی سطح روتور C ریخته می شوند. کلیه دانه ها در حین عبور از فضای تخلیه کرونا توسط الکترود B باردار می گردند. چگالی بار سطحی آن ها (r) بستگی به شکل دانه ها، میزان بار ورودی، سرعت عبور دانه ها و شدت تخلیه کرونا دارد. بیشترین مقدار چگالی بار سطحی در هوا حدود 27×10^{-6} است. زمانی که دانه ها از فضای تخلیه کرونا خارج می شوند، با سرعتی که تابعی از مقاومت الکتریکی دانه ها میزان تماس آن ها با روتور وچگالی بار سطحی اولیه آن هاست بار خود را از دست می دهند. دانه های هادی بار خود را به سرعت با روتور مبادله می کنند و مشابه زمانی که هیچ میدان الکتریکی بر آن ها اثر نکرده است تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز ناشی از دوران روتور و نیروی ثقل سقوط می نمایند. جدول ۴-۱ نمونه رفتار کانی های مختلف را در یک دستگاه جداکننده فشار قوی نشان می دهد. کانی های ستون سمت راست به دلیل هادی بودن سریع بار خود را از دست داده و از روتور جدا می شوند. کانی های ستون سمت چپ به دلیل عایق بودن جذب روتور شده و مسافتی را با آن حرکت می نمایند.

جدول ۴-۱- رفتار برخی کانی های قابل جداسازی در یک جداکننده الکترواستاتیک فشار قوی

Minerals pinned to rotor	*Minerals thrown from rotor*
Apatite	Cassiterite
Barite	Chromite
Calcite	Diamond
Corundum	Fluorspar
Garnet	Galena
Gypsum	Gold
Kyanite	Hematite
Monazite	Ilmenite
Quartz	Limonite
Scheelite	Magnetite
Sillimonite	Pyrite
Spinel	Rutile
Tourmaline	Sphalerite
Zircon	Stibnite
	Tantalite
	Wolframite

۳-۳- باردار کردن با القا هدایتی – جدا کننده های اتصالی

هرگاه مخلوطی از دانه های هادی و غیر هادی در یک میدان الکتریکی در تماس با یکی از الکترودها قرار گیرند، دانه های هادی به سرعت باردار می شوند و در بیشتر موارد می توان آن ها را از دانه های غیر هادی که با سرعت کمتری باردار می گردند، جدا کرد. در این شرایط دانه ها ممکن است در اثر تماس با الکترود یا تماس با دانه های دیگر باردار شوند. بنابراین مکانیزم کلی باردار شدن پیچیده بوده پیش بینی آن دشوار است.
هرگاه یک جسم کوچک هادی و کروی شکل بر روی یکی از جوشن های یک خازن هوایی قرار گرفته باشد بار ماکزیمم آن برابر است با:

$$q = 1.65 \times 4\pi r^2 \varepsilon_0 E_0$$

که در آن

r : شعاع جسم

E_0: شدت میدان الکتریکی بین جوشن های خازن بدون حضور جسم جامد

رایج ترین مقدار E_0 در این نوع جدا کننده حدود $4\times10^5 V/m$ است، بنابراین می توان انتظار داشت که چگالی بار سطحی حاصل از این مکانیزم معادل مقدار زیر باشد:

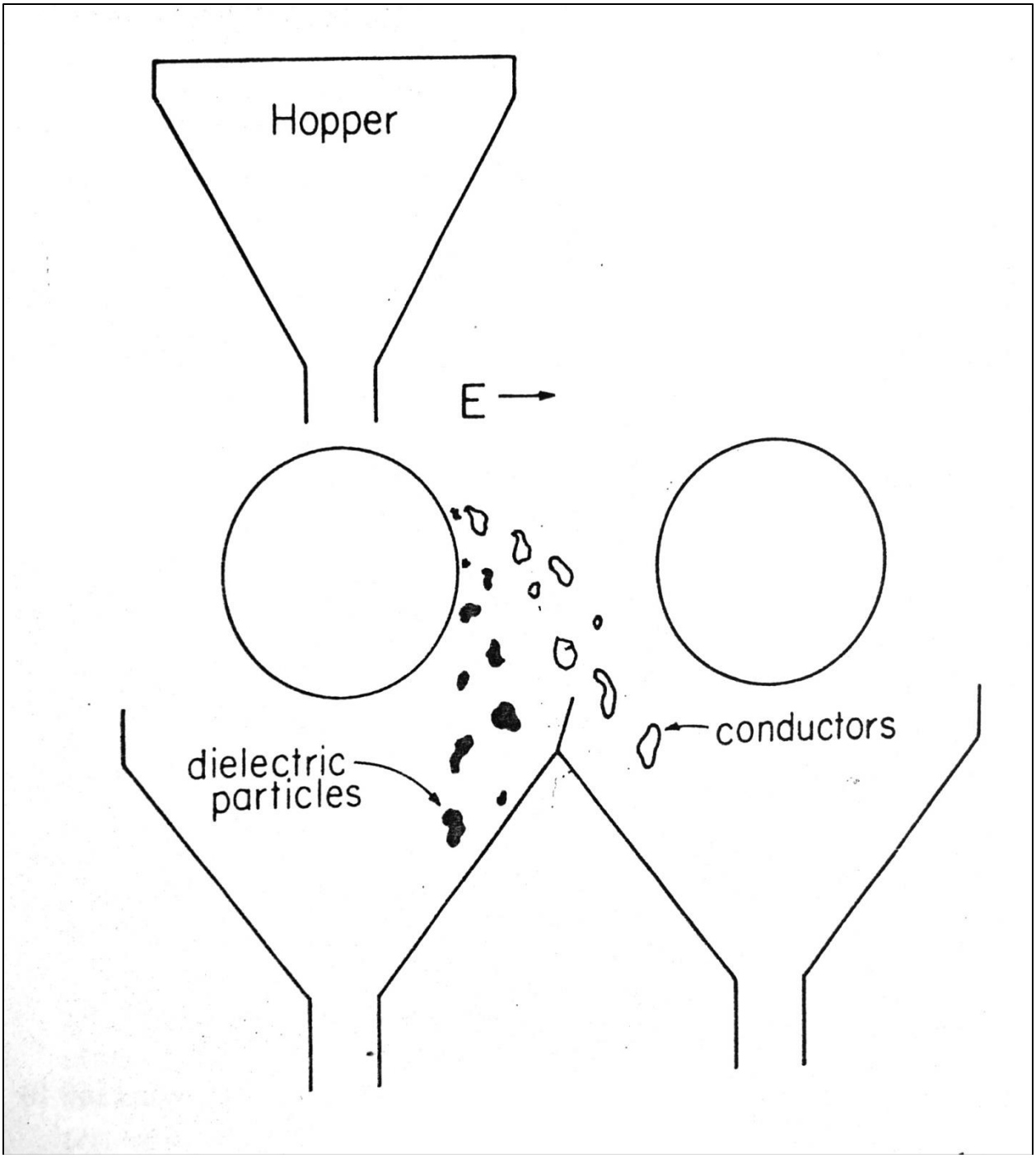
$$\gamma = \frac{1.65 \times 4\pi r^2 (8.85 \times 10^{-12})(4 \times 10^{5)}}{4\pi r^2} = 6\,\mu c/m^2$$

مقادیر رایج γ به روش های اتصال و تخلیه کرونا به شرح زیر است:

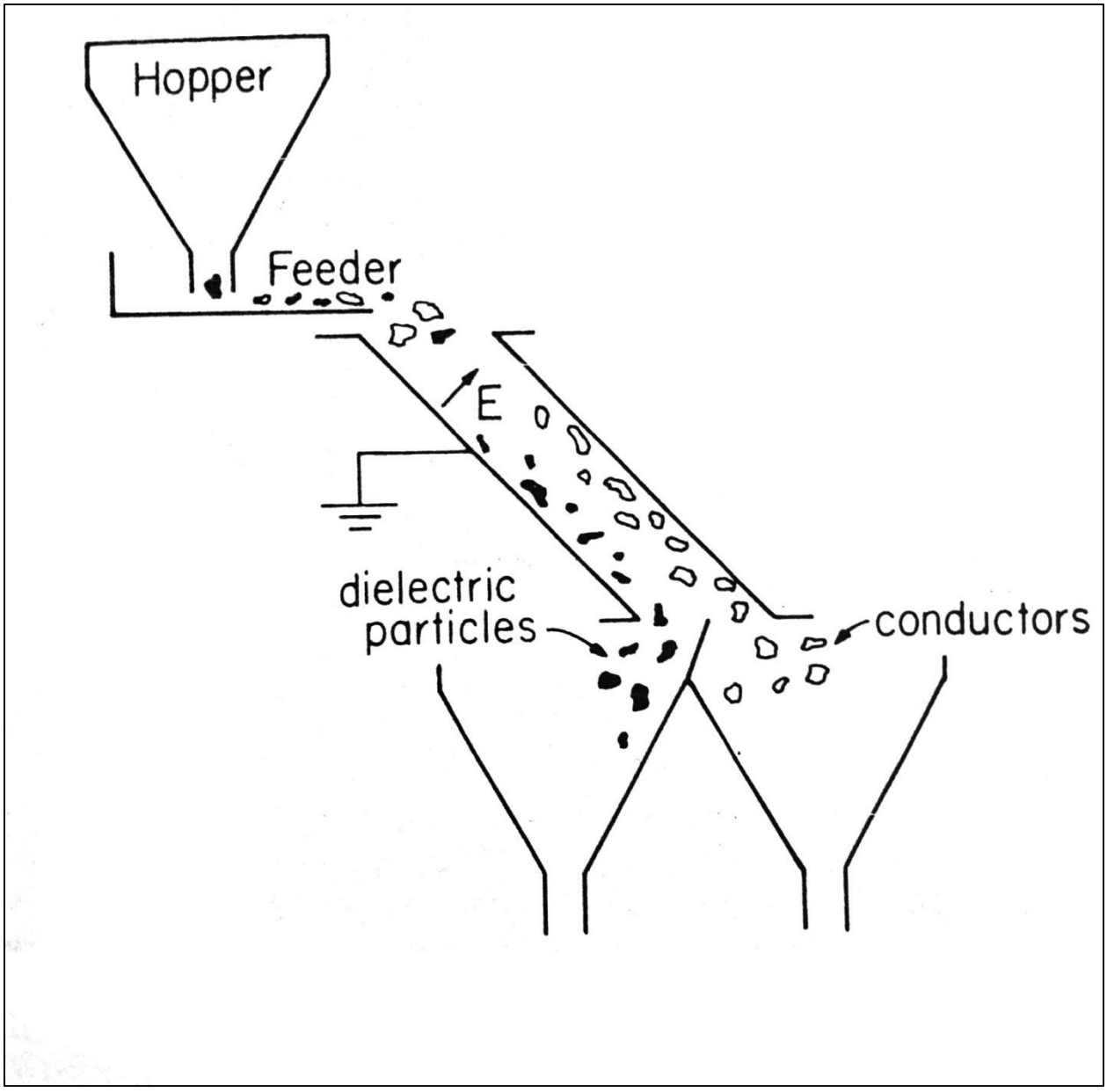
اتصال : $\gamma = 0 - 3\ \mu C/m^2$

کرون : $\gamma = 4 - 6\,\mu C/m^2$

در عمل چگالی بار سطحی تابعی از شکل دانه ، زمان تماس و هدایت الکتریکی آن است.

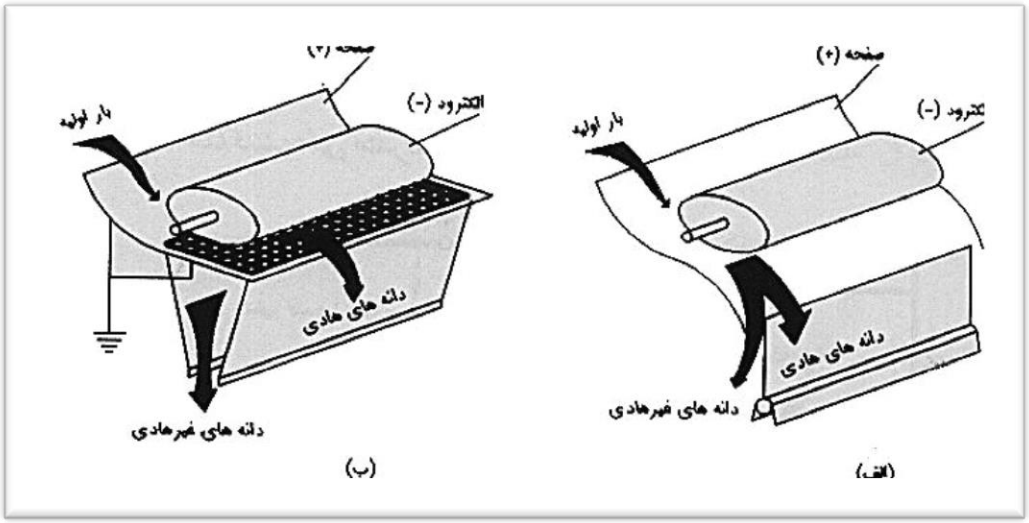


شکل۴-۳- جدا کننده اتصالی-نوع استوانه ای



شکل۴-۴- جدا کننده اتصالی- نوع صفحه ای

جدا کننده های اتصالی در انواع مختلفی ساخته شده اند که شکل۴-۵ این جداکننده ها را نشان می دهد. ظرفیت این جداکننده ها حدود ۰/۵ تا ۲ تن در ساعت است.

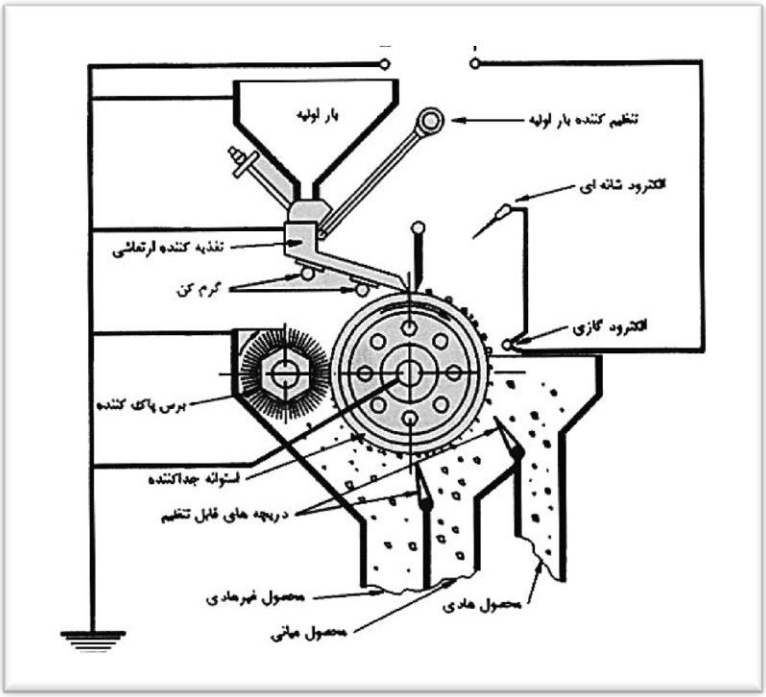


شکل ۴-۵- جدا کننده الکترو استاتیکی نوع صفحه ای (الف) و سرندی (ب)

در سالهای اخیر با تغییراتی که بر روی نوع صفحه ای داده شده است بازدهی آن به مراتب افزایش یافته است. در این جدا کننده یکی از الکترودها دارای سطح مقطعی نسبتا بزرگ و بیضی شکل می باشد که به موازات الکترود دیگر با اختلاف پتانسیل زیاد قرار دارد. الکترود دیگر به صورت سطحی شیب دار است که بسته به نوع کاربرد مورد نظر ممکن است از یک صفحه فلزی و یا یک سطح سرندی تشکیل شده باشند. نوع صفحه ای برای آرایش ماده ای که بخش عمده ی آن را دانه های هادی تشکیل داده باشند مناسب بوده و نوع سرندی آن به عکس برای آرایش ماده ای که بخش عمده آن را دانه های عایق تشکیل داده باشند مناسب است. همان طور که در جدا کننده های با جریان فشار قوی مشاهده شد، معمولا دانه های درشت ماده عایق همراه با دانه های هادی و دانه های کوچک ماده هادی همراه با دانه های عایق جدا می شوند. جدا کننده های اتصالی معمولا برای آرایش نهایی محصولات فوق بکار می روند. در این نوع جدا کننده دانه های هادی در اثر القا هدایتی باردار می شوند و لذا از روی صفحه فلزی یا سرندی تمایل به جهش به طرف بالا را دارند، حال آن که دانه های عایق در نوع صفحه ای بر روی صفحه می لغزند و از انتهای آن به طور آزاد سقوط می کنند و در نوع سرندی از سوراخ های سرند عبور می نمایند و از دانه های هادی جدا می شوند.

لازم به تذکر است که پلاریته الکترود دارای اهمیت زیادی است. ظرفیت جدا کننده ای از این نوع به عرض ۱/۸ متر برای آرایش ماسه های ساحلی در حدود ۱/۵ تن در ساعت است.

٤- جدا کننده های متفرقه



شکل۴-۶- یکی از انواع جدا کننده های الکتریکی

انواع متعددی از جدا کننده های الکترواستاتیکی به منظور کاربردهای خاص ساخته شده انـد و اسـتفاده از آن ها به قدری محدود است که در اینجا از شرح آن ها خودداری می شود. به عنوان مثال می تـوان جـدا کننـده های نواری، جدا کننده ها به شکل میز لرزان، جدا کننده های با جریان متناوب، جـدا کننـده هـای بـا الکتـرود گازی، جدا کننده های ضربه ای و جدا کننده ها با واسطه دی الکتریک را نام برد. شکل ۴-۶ جـدا کننـده ای مجهز به دو نوع الکترود شانه ای و گازی را نشان می دهد.

فصل پنجم

جدایش مغناطیسی

۱- مقدمه

یونانیان باستان از ۵۵۰ سال قبل از میلاد با برخی از پدیده های مغناطیسی آشنا بودند. هم چنین سقراط مشاهده کرد که سنگی را که یوروپیدز نامیده شده بود، خواصی دارد که به راحتی حلقه های آهنی را جذب می کند و به مواد مشابه خود نیرویی وارد می نماید که این نیرو را نیروی مغناطیسی نامیدند. اولین تلاش ها جهت فرآوری کانه های مگنتیتی با استفاده از آهنرباهای دائمی به قرن ۱۷ میلادی برمی گردد که توسط درکاچ انجام شد. در همان زمان آقای رزلر برای جدایش کاسیتریت از آلودگی آهن که با شستشو تمیز نمی شد، از جدایش مغناطیسی با یک آهنربای دستی استفاده کرد. آهنرباهای الکترومغناطیسی برای اولین بار در سال ۱۸۵۵ توسط آقای نانتپونی برای تولید میدان مغناطیسی پیشنهاد شد و در واقع یک گام مهم در زمینه پیشرفت این وسیله بود و در سال ۱۸۷۰ اولین جداکننده پیوسته با یک استوانه الکترو مغناطیسی دوار که مواد تغلیظ شده مگنتیتی را بیرون از منطقه جدایش تخلیه می کرد، پیشنهاد شد و سرانجام در سال ۱۸۸۴ جداکننده استوانه ای که آهنربای آن حالت ثابت داشت در صنعت بکار رفت. بنابراین استفاده از نیروی مغناطیسی در صنعت فرآوری کانه ها به طور دقیق از اوسط قرن ۱۹ میلادی شروع شد و توسط تعدادی از محققان برای جداسازی کانه های درشت آهن شدیداً مغناطیسی از گانگ های غیر مغناطیسی به کار رفت. این موضوع در جهت جدایش کانه های مغناطیسی از کانه هایی که خواص مغناطیسی کمتری دارند نیز از اواخر قرن ۱۹ میلادی در جداکننده های مغناطیسی متعددی مورد استفاده قرار گرفت. به موازات پیشرفت و توسعه در جداکننده های مغناطیسی، فرآوری کانسنگ آهن نیز به شکل اصولی از همان اواخر قرن ۱۹ و با تاکید بر کانسنگ های رسوبی آغاز شد و با استخراج ذخایر تاکونیتی توسعه یافت. با کاهش ذخایر پر عیار معدنی و تمایل به کاهش هزینه ها از یک سو و نیاز مبرم صنایع معدنی به کنسانتره ای با کیفیت بهتر از سوی دیگر، باعث تغییرات و پیشرفت هایی در این نوع جداکننده ها شده است. پیشرفت های اخیر که در زمینه فهم مسائل بنیادین مغناطیس شوندگی و موادی با مغناطیس دائم صورت گرفته موجب شده است تا جدایش مغناطیسی برای جداسازی موادی با ابعاد درشت تا ذرات ریز کلوئیدی، همچنین ذراتی با خاصیت مغناطیسی قوی تا ذرات دیا مغناطیس بکار برده شود.

در جدایش مغناطیسی از خواص مغناطیسی برای جداسازی کانی های با ارزش از گانگ غیر مغناطیسی استفاده می شود. مانند جدایش های منیتیت از کوارتز، ولفرامیت $[(Fe,Mn)WO_4]$ و منیتیت از کاسیتریت. همه مواد وقتی در یک میدان مغناطیسی قرار داده می شوند، به نوعی تحت تاثیر قرار می گیرند.

خواص مغناطیسی مواد

مواد بر اساس این که به یک آهن ربا جذب و یا از آن دفع شوند به دو دسته بزرگ تقسیم می شوند:

۱- دیامگنتیک (Diamagnetic):

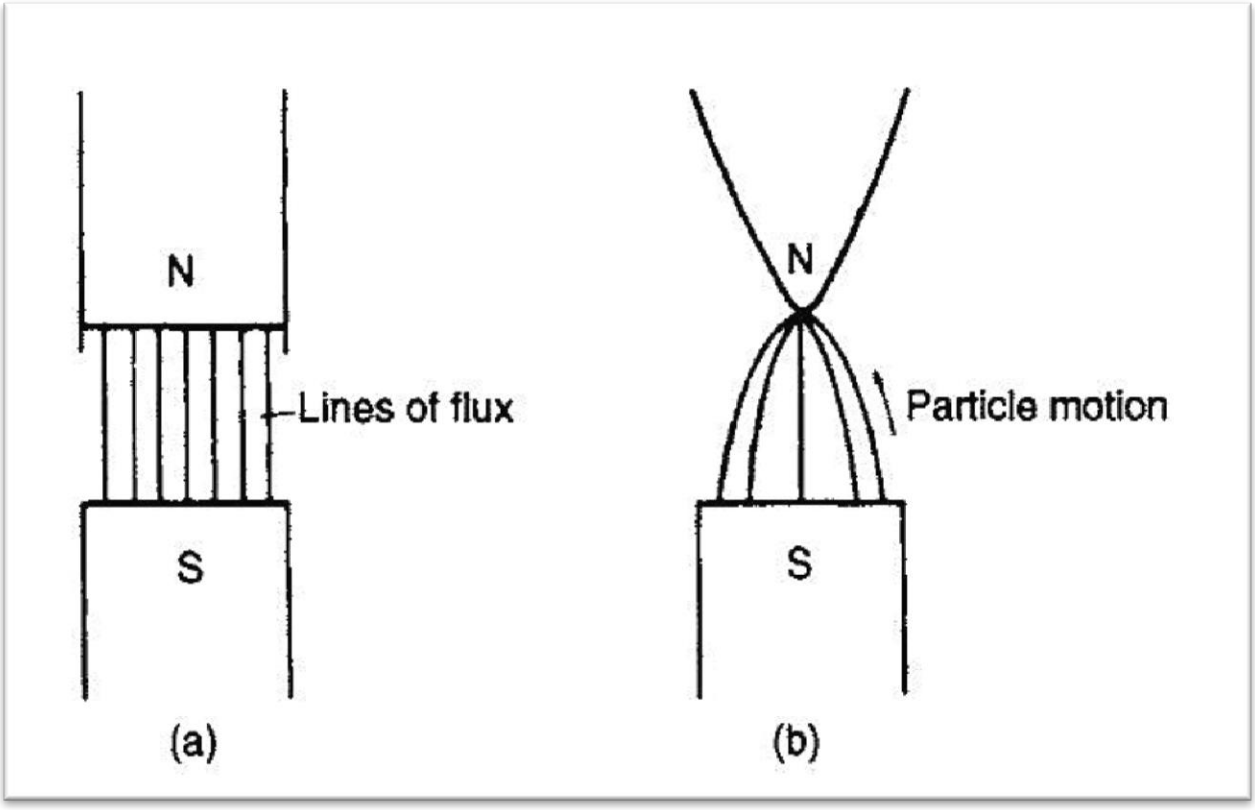
موادی هستند که در طول خطوط نیروی مغناطیسی به سمت شدت میدان کمتر دفع می شوند.

۲- پارامگنتیک (Paramagnetic):

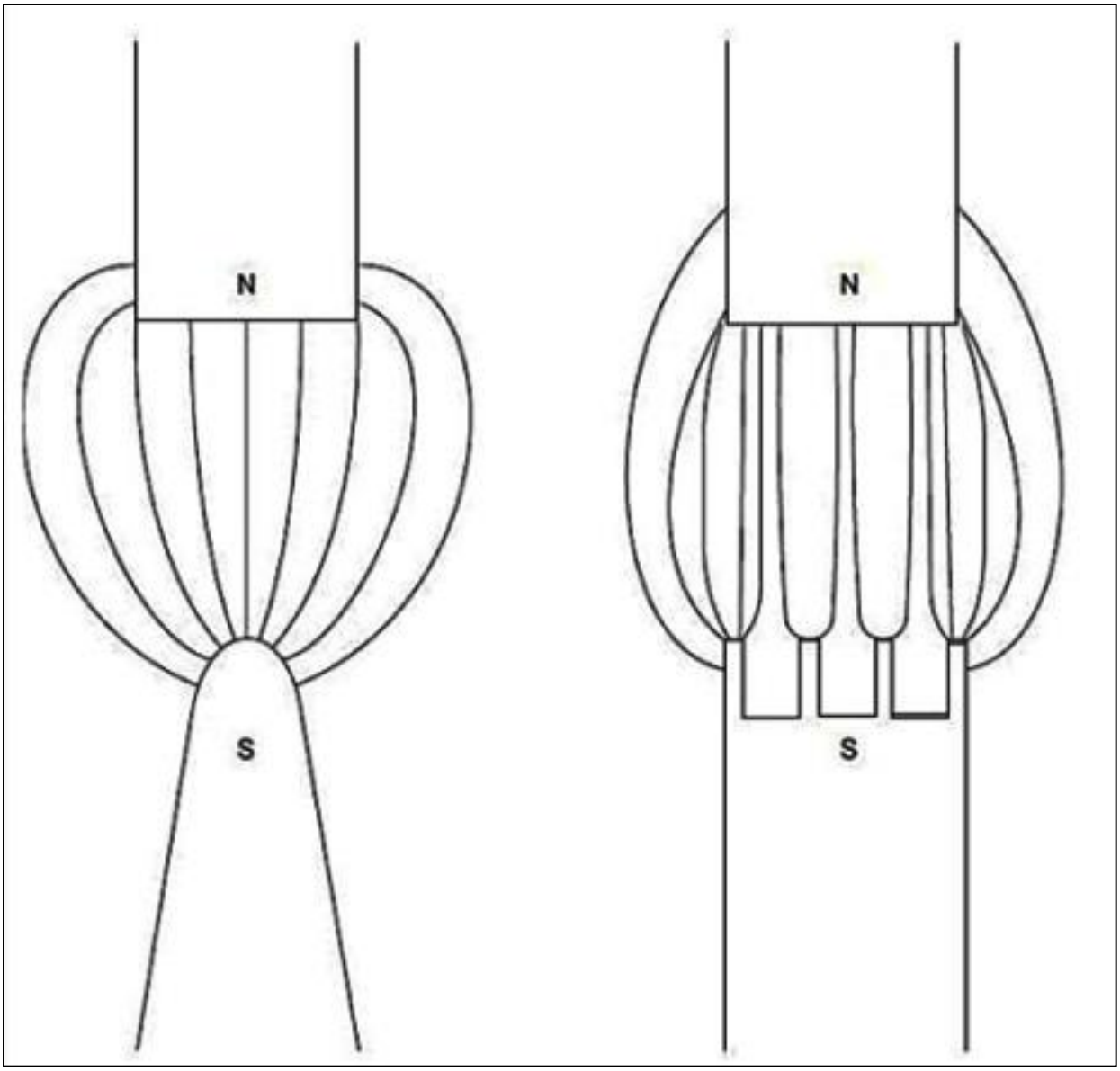
موادی هستند که در طول خطوط نیروی مغناطیسی به سمت شدت میدان بیشتر جذب می شوند.

یک حالت خاص از مواد پارامگنتیک، فرو مگنتیک (Ferromagnetic) نام دارد که دارای خاصیت مغناطیسی شدن بالایی هستند و در صورت خارج شدن از میدان مغناطیسی، مقداری از خاصیت مغناطیسی در آن باقی می ماند.

برای تولید یک نیروی مغناطیسی موثر برای جداکردن ذرات بایستی شدت میدان مغناطیسی و گرادیان هر دو بالا باشند. شکل ۵-۱ دو نوع میدان مغناطیسی یکنواخت و همگرا را نشان می دهد. در طرح a به دلیل این که گرادیان میدان مغناطیسی صفر است، مطلوب نیست و در نتیجه ذرات حرکت نخواهند کرد. در طرح b به دلیل وجود گرادیان میدان مغناطیسی، ذره به طرف شدت میدان بیشتر حرکت خواهد کرد. شکل ۵-۲ دو روش ایجاد میدان مغناطیسی غیر یکنواخت، برای ایجاد گرادیان میدان مغناطیسی را نشان می دهد.

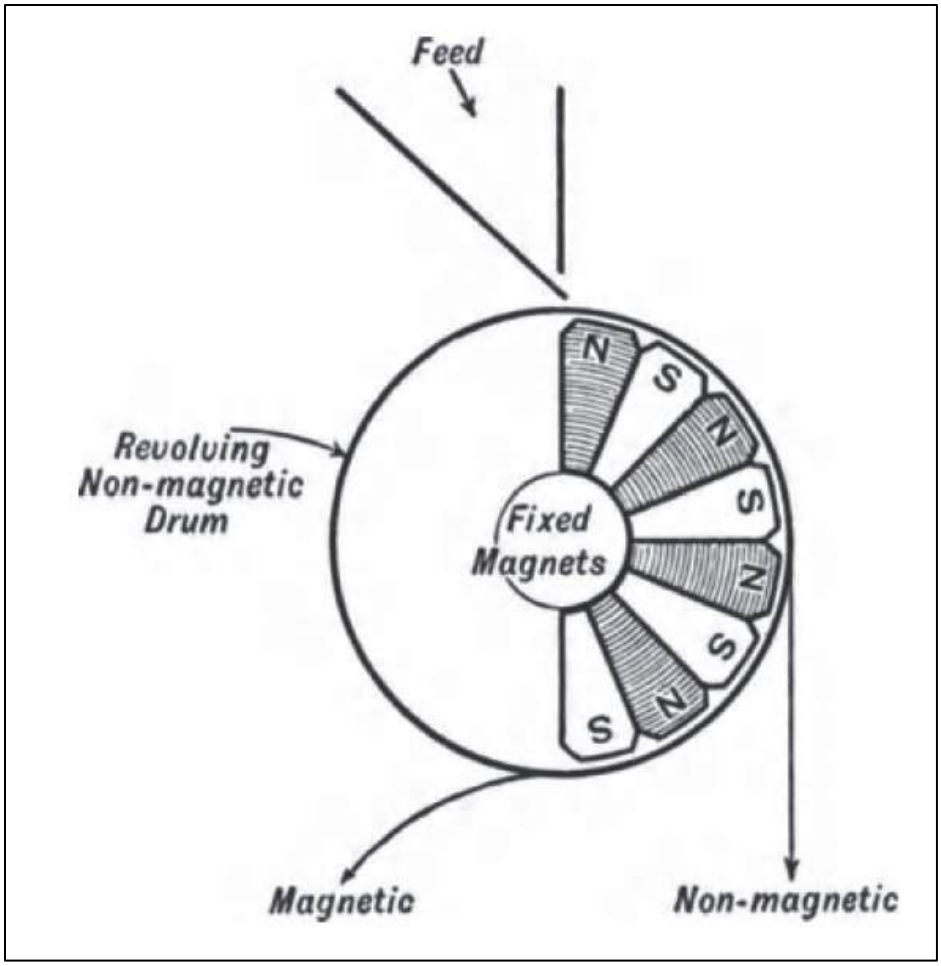


شکل۵-۱- دو نوع میدان مغناطیسی یکنواخت و همگرا



شکل ۵-۲- دو روش ایجاد میدان مغناطیسی غیر یکنواخت جهت تامین گرادیان مناسب برای جداسازی

برای جلوگیری از فلوکولاسیون (تجمع) ذرات، از روش گذراندن مواد از میان میدان های مغناطیسی کـه قطـب های آن معکوس است، استفاده شده و این مشکل به حداقل رسانده می شود. شکل ۵-۳ شمایی از آرایش قطب های مغناطیسی در یک جدا کننده را نشان می دهد.



شکل ۵-۳- چگونگی آرایش قطب های مغناطیسی جهت جلوگیری از به دام افتادن ذرات غیر مغناطیسی

۲- انواع جداکننده های مغناطیسی

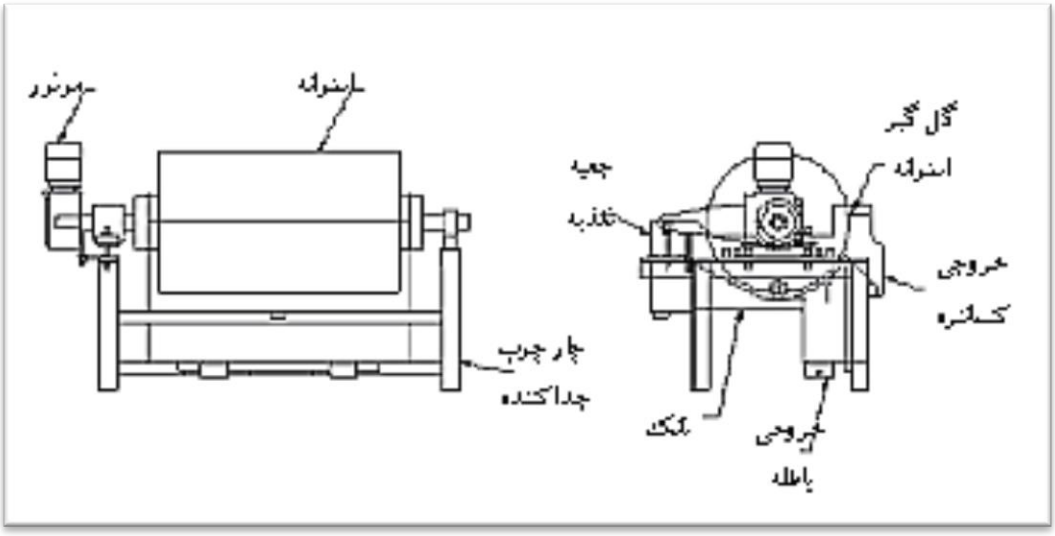
جداکننده های مغناطیسی برحسب مورد و با توجه به نوع کاربری آن ها به انواع مختلفی تقسیم می شوند. با توجه به سیالی که جریان مواد را در جداکننده ایجاد می کند، به انواع جداکننده خشک و تر تقسیم می شوند. در حالی که بر اساس شدت میدان به انواع شدت پایین، متوسط و شدت بالا تقسیم می شوند. این تقسیم بندی گرادیان میدان مغناطیسی را در بر نمی گیرد، در حالی که پارامتر مهمی در انتخاب جداکننده محسوب می شود. بنابراین می توان جداکننده های شدت پایین و بالا را بترتیب به انواع گرادیان پایین و گرادیان بالا نیز تقسیم نمود. جداکننده های مغناطیسی شدت پایین معمولاً از شدت میدانی کمتر از ۰/۲ تسلا (۲۰۰۰ گوس) جهت جدایش کانی های فرومنیتیت مانند منیتیت و ماگهمیت بهره می گیرند. جداکننده های شدت بالا اغلب برای

جدایش کانی های پارامنیتیت مانند هماتیت و ایلمنیت بکار برده می شوند و شدت میدان آن ها معمولاً بیش از ۰/۵ تسلا(۵۰۰۰ گوس) می باشد.

۳- جداکننده های مغناطیسی استوانه ای تر با شدت پایین

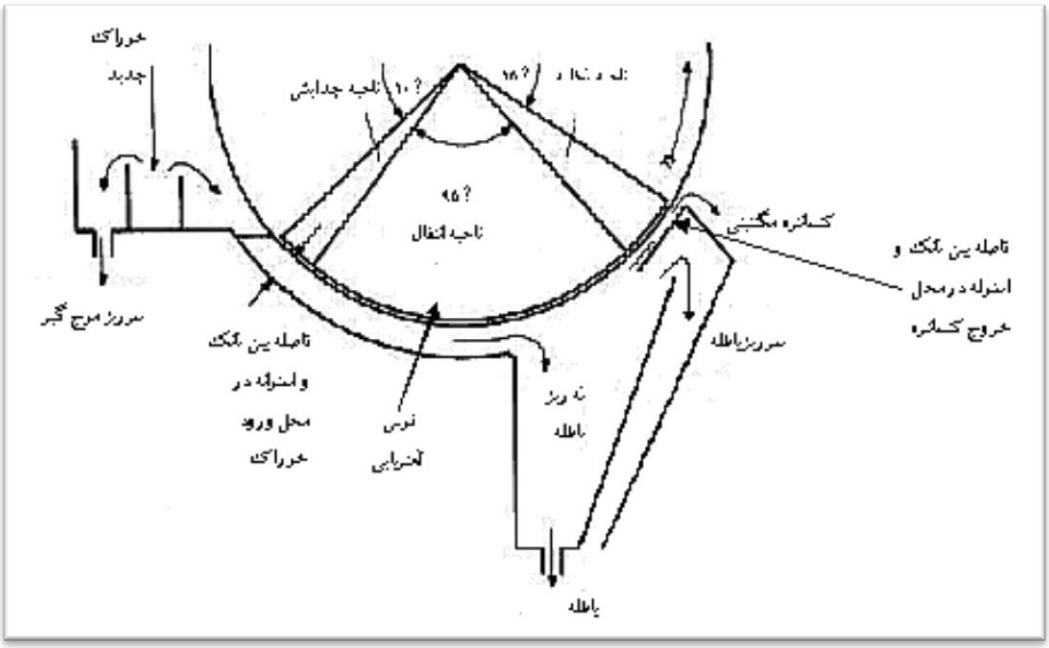
این جداکننده ها در طراحی های اولیه خود به دلیل مشکلاتی مانند تغییرات بار ورودی، نوع مخزن و شرایط جریان پالپ از یک سو و عدم به کارگیری ترکیبات مناسبی از شدت میدان و گرادیان میدان مغناطیسی از سوی دیگر، در مورد کانسنگ های حاوی مواد فرو مغناطیس چندان موفق نبوده است، ولی با پیشرفت تکنولوژی، مدل های تجربی خاصی برای پر عیار سازی کانسنگ آهن با این نوع جداکننده ها بر اساس آزمایشات لوله دیویس ارائه شده است.

در استفاده از جداکننده های مغناطیسی شدت پایین معمولا جداکننده های استوانه ای بکار برده می شوند. با پیدایش آهنرباهای دائمی فریت، این آهنرباها تقریبا به طور کامل جایگزین آهنرباهای الکترومغناطیس در استوانه های مغناطیسی شده اند. از این جداکننده ها در اصل برای بازیابی واسطه سنگین مثل مگنتیت و فروسیلکون، در روش جدایش ثقلی و همچنین برای پر عیار سازی مواد شدیدا مغناطسی مثل مگنتیت استفاده می شود. قلب یک جداکننده مغناطیسی، مجموعه استوانه مغناطیسی آن است که ترکیبی از بخش مغناطیسی(آهنربا) جداکننده است که درون استوانه غیر مغناطیسی قرار گرفته است. به هنگام عملیات، استوانه اطراف مجموعه مغناطیسی می چرخد و ذراتی را که به صورت مغناطیسی روی سطح استوانه جذب شده اند را به ناحیه تخلیه کنسانتره منتقل می کند. دو طرف استوانه را از جنس آلیاژهای آلومینیومی غیر مغناطیسی و پوسته آن را از فولاد ضد زنگ غیر مغناطیسی به ضخامت ۳ میلی متر می پوشانند. پوسته استوانه معمولا علاوه بر فولاد ضد زنگ توسط پوسته لاستیکی یا پلی اورتان به ضخامت ۲ میلی متر نیز پوشانده می شود تا به این ترتیب از ساییده شدن پوسته توسط مواد جلوگیری شود. جعبه تغذیه و تانک زیر استوانه مغناطیسی هم معمولا از فولاد ضد زنگ به ضخامت ۳ میلی متر وبه صورت پیوسته ساخته می شود. قسمت داخلی آن هم ممکن است با پلی اورتان پوشانده شود. در شکل ۵-۴ تصویر شماتیکی از یک جداکننده مغناطیسی استوانه ای با جریان معمولی نشان داده شده است.



شکل۵-۴- شمایی از یک جداکننده مغناطیسی استوانه ای با جریان معمولی

در این جداکننده ها تعداد ۳ تا ۶ قطعه آهنربای دائمی (آلیاژهای سرامیکی) با قطب های معکوس نسبت به یکدیگر در فاصله بسیار کوچکی (در حد ۱/۵ میلی متر) از پوسته ضد زنگ استوانه قرار گرفته اند. شعاع قوسی که آهنرباها در پشت آن واقع شده به صورت معمول در حد ۱۱۵ تا ۱۲۰ درجه می باشد (شکل۵-۵). قطعه های استاندارد مغناطیسی در ابعاد ۲۵×۱۰۰×۱۵۰ میلی متر که به ترتیب، از راست به چپ معرف ضخامت، پهنا و طول قطعه می باشند، ساخته می شوند. قطعه ها در راستای ضخامت، مغناطیسی شده اند و برای تنظیم کردن مجموعه های آهنربایی درون یک استوانه، قطعات مغناطیسی را بر روی یکدیگر یا در کنار یکدیگر چیده می شوند.



شکل۵-۵- نحوه جریان پالپ و قوس قرار گیری آهنربا در استوانه مغناطیسی شدت پایین

برای تنظیم مجموعه استوانه مغناطیسی به روش تر، موارد زیر لازم است:

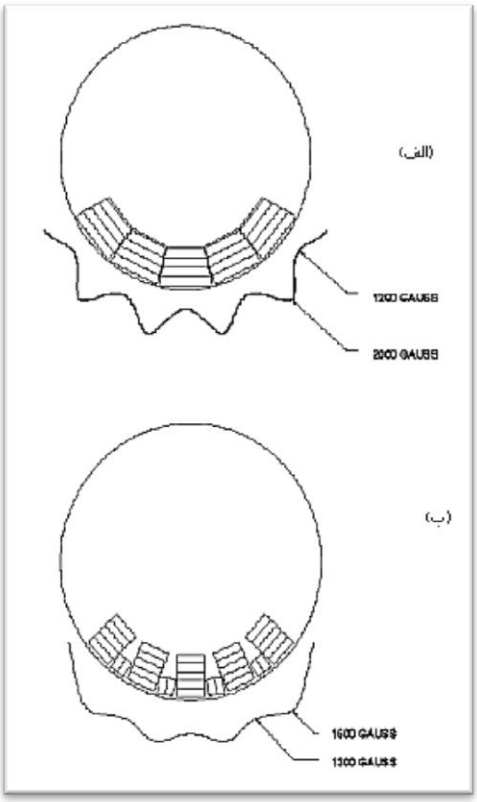
الف) یک میدان قوی مغناطیسی به همراه گرادیان بالا در نقطه ورودی خوراک.

ب) یک مقطع مناسب از میدان مغناطیسی روی سطح استوانه، به طوری که ذرات مغناطیسی به راحتی قطبی به قطب دیگر منتقل شده تا به نقطه تخلیه برسند.

در استوانه های مغناطیسی برای ایجاد شدت میدان و گرادیان های قوی، آهنرباها در طول محیط استوانه به دو طریق کلی چیده می شوند (مقطع عرضی استوانه):

الف) نوع با گرادیان بالا:

در این حالت قطعه های آهنربایی بر روی یکدیگر قرار گرفته وتغییر قطبیت شمالی- جنوبی در آن ها تنظیم می شود. شکل ۵-۶ مقطع و شدت میدان مغناطیسی را برای این حالت روی سطح استوانه نشان می دهد.



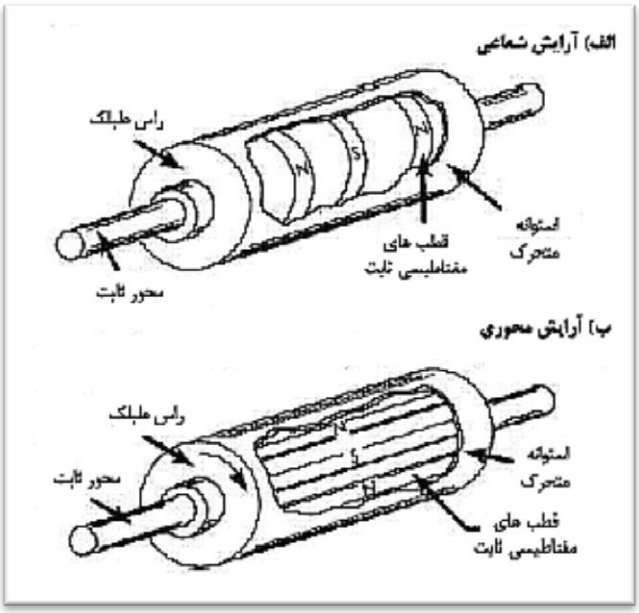
شکل۵-۶- تنظیمات آهنربا ها در یک استوانه مغناطیسی برای تولید شدت های مختلف

الف)نوع گرادیان بالا و ب) نوع با قطب کمکی

در این نوع انتقال ذرات مغناطیسی از یک قطب به قطب دیگر به راحتی انجام نمی شود و باکاهش سرعت استوانه نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات با محدودیت روبرو خواهد شد. همچنین در یک جداکننده اولیه از این تنظیم استفاده نمی شود.

ب) نوع با قطب کمکی:

دراین حالت قطعه های کوچک آهنربایی بین قطعه های اصلی قرار می گیرند و قطبیت مغناطیسی را که ایجاد می کنند متصل به قطبیت قطعات اصلی خواهد بود (شکل ۵-۶- ب). انتقال ذرات به راحتی صورت می گیرد و محدودیت در نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات حتی در استوانه های با سرعت پایین هم وجود ندارد. باکاهش درصد جامد اسلاری، بازیابی جدایش کاهش می یابد. این نوع تنظیم، در جداکننده های مرحله دوم استفاده نمی شود. تنظیم شعاعی و محوری آهنرباها در پهنای استوانه نیز دو روش معمول برای تنظیم آهنرباهای دائمی درون جداکنندهای استوانه ای شدت پایین می باشد (شکل۵-۷).



شکل۵-۷- آرایش محوری و شعاعی آهنرباها در جدا کننده های استوانه ای شدت پایین

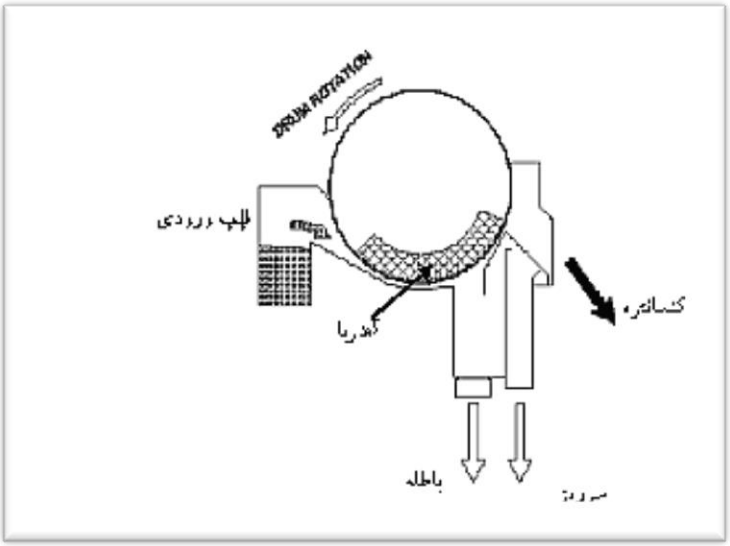
هدف از این تنظیم صرفا تغییر در نحوه انتقال مواد مغناطیسی درون تانک است. در حالت شعاعی قطبیت آهنرباهای دائمی در پهنای استوانه تغییر می کند ولی در حالت محوری تغییرات قطب های مغناطیسی در طول محیط استوانه تغییر می کند. استوانه مغناطیسی با آراش شعاعی معمولا در جایی استفاده می شود که هدف بازیابی بالا باشد و استوانه ی مغناطیسی با آرایش محوری، در جایی استفاده می شود که به عیار بالایی از ذرات شدیداً مغناطیسی نیاز باشد. به عبارت دیگر، تنظیم محوری آهنرباها مربوط به زمانی است که عیار کنسانتره مورد نظر باشد. در حالت محوری، حرکت متلاطم مجموعه های به هم چسبیده ای از ذرات مغناطیسی بر روی ردیف های آهنربایی، همراه با تغییر قطب های مغناطیسی موجب آزاد شدن ذرات به دام افتاده غیر مغناطیسی می شود، در نتیجه عیار کنسانتره افزایش می یابد.

۳-۱- انواع جداکننده های مغناطیسی استوانه ای شدت پایین

این جداکننده ها بر اساس جهت جریان پالپ درون جداکننده نسبت به جهت چرخش استوانه به انواع زیر تقسیم می شوند:

الف) نوع هم جهت:

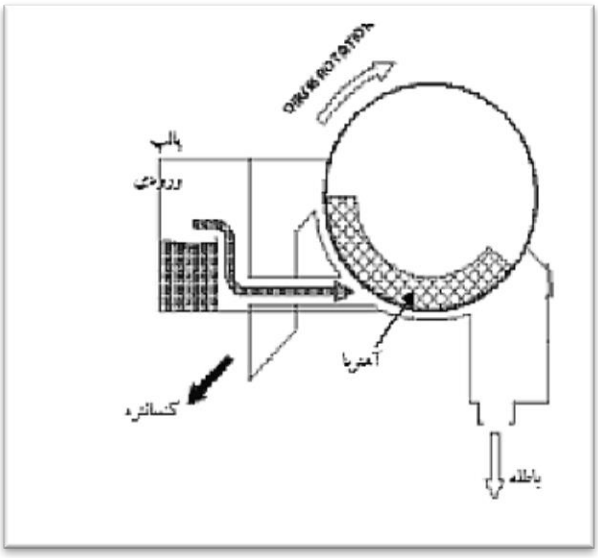
در این جداکنند ها مواد پر عیار شده در جهت حرکت استوانه مغناطیسی و حرکت پالپ جابجا می شوند. در این راستا ذرات مغناطیسی به یکدیگر چسبیده، به سطح استوانه متصل شده و با حرکت استوانه به نقطه ای خارج از میدان مغناطیسی و محل تخلیه کنسانتره منتقل می شوند. ذرات غیر مغناطیسی به همراه آب از بخش انتهایی دریچه تخلیه باطله خارج می گردند (شکل۵-۸). این جداکننده ها نسبت به تغییرات سطح پالپ بسیار حساس هستند و با کاهش سطح پالپ، راندمان جدایش به شدت افت می کند. بنابراین برای دستیابی به جدایش مطلوب، می بایست بار اولیه به صورت ثابت وارد دستگاه شود تا در سطح آب آن تغییری ایجاد نگردد. این جداکننده ها قادرند دانه بندی در حد ۶ تا ۸ میلی متر را هم فرآوری نمایند. البته با تغییرات خاصی که صورت گرفته می توانند ذراتی در حد ۱۵ میلی متر را نیز فرآوری کنند. جداکننده های مغناطیسی شدت پایین جهت فرآوری ذرات زیر ۱۰ میکرون با مشکل مواجه اند، زیرا در این دانه بندی معمولا نیروی مقاومت هیدرو دینامیکی بر نیروی مغناطیسی غلبه می کند. درصد جامد مناسب برای این تانک ها بین ۳۰ تا ۵۰ درصد می باشد.



شکل ۵-۸- جداکننده هم جهت با چرخش استوانه

ب) جداکننده های غیر هم جهت با چرخش استوانه:

در این جداکننده ها پالپ پس از عبور از یک جعبه تغذیه مخصوص، در جهت مخالف چرخش استوانه به تانک وارد می شود. در این نوع تانک ناودان تخلیه کنسانتره در زیر جعبه تغذیه قرار گرفته است (شکل ۵-۹).



شکل ۵-۹- جداکننده غیر هم جهت با چرخش استوانه

در اینجا تخلیه باطله سریع صورت می گیرد و از آنجا که باطله بطور کامل در طول قوس میدان مغناطیسی جریان می یابد، بنابراین میزان تلفات مواد مغناطیسی کمترین مقدار خواهد بود. بر این اساس از این جداکننده ها برای مرحله رافر استفاده می شود. ابعاد بار اولیه در این جداکننده ها باید زیر ۱ میلی متر باشد. مزایای این نوع تانک ها را می توان در عناوین زیر خلاصه نمود:

۱- حداکثر بازیابی:

ذرات مغناطیسی بازیابی شده برای انتقال به ناودان تخلیه کنسانتره مسیر کوتاهی را طی می کنند و اگر ذراتی در ناحیه اولیه جدایش به خطا بازیابی نشوند، بالاخره در بخش باقی مانده ناحیه مغناطیسی جذب خواهند شد. در مقادیر بالایی از دبی نیز دارای بازیابی خوبی می باشد.

۲- انتقال بهتر نیروی مغناطیسی:

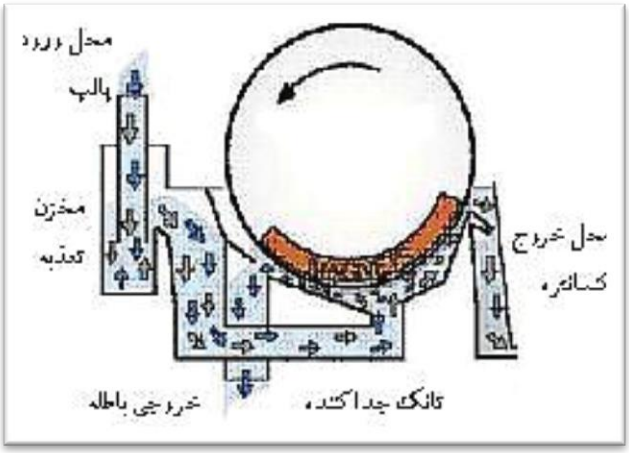
باوجود کوتاه بودن ناحیه انتقال ذرات، اما نیروی مغناطیسی بالایی را می تواند منتقل کند.

۳- فضای کمتری اشغال می کنند:

از آنجایی که ناحیه تخلیه کنسانتره زیر بخش ورودی خوراک است، بنابراین این تانک ها از نظر مکانی جای کمتری را می گیرند و در کارخانه هایی که مشکل جانمایی دارند، مفید هستند.

ج) نوع غیرهم جهت با جریان پالپ:

در این جداکننده ها جریان پالپ مخالف جهت چرخش استوانه بوده و به نوع استیفن سون (steffenson) معروف است. از این نوع جداکننده برای مرحله نهایی پر عیار سازی استفاده می شود. واژه غیر هم جهت با جریان پالپ از جریان باطله که در خلاف جهت چرخش استوانه است گرفته شده. این جدا کننده ها برای پرعیار سازی ذرات زیر ۲۵۰ میکرون مناسب هستند (شکل۵-۱۰).



شکل۵-۱۰- نوع غیرهم جهت با جریان پالپ

فصل پنجم

منابع

۱- سام، عباس؛ رنجبر، محمد؛ "فرآوری مواد معدنی مقدماتی"
۲- سام، عباس؛ "کانه آرایی پیشرفته"
۳- سام، عباس؛ ناصح، رضا؛ "فرآوری ذرات ریز" ۱۳۹۳
۴- نعمت اللهی، حسین؛ "کانه آرایی" انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم ۱۳۸۴
۵- رضایی، بهرام؛ "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی – پر عیار سازی به روش مغناطیسی" مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول، ۱۳۷۸
۶- رضایی، بهرام؛ "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی – پر عیار سازی به روش ثقلی" مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول، ۱۳۷۸
۷- بنیسی، صمد؛ "مسائل کاربردی فرآوری مواد معدنی" انتشارات دانشگاه هرمزگان، چاپ سوم، ۱۳۸۸

8- Wills, Barry A. Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Butterworth-Heinemann, 2011.

9- Pryor, M. R. Mineral processing. Springer Science & Business Media, 2012.

10- Darling, Peter. SME mining engineering handbook. Vol. 1. SME, 2011.

11- Rath, R. K., and Ratnakar Singh. "Gravity Concentration of Iron Ore." (2007): 74-88.

12- Honaker, Ricky Quay, and William Richard Forrest. Advances in gravity concentration. SME, 2003.

13- Drzymala, J. "Mineral processing." Foundation of Theory and Practice of Metallurgy. Oficyna Wydawnicza PWr, Wroclaw (2007).

14- Fuerstenau, Maurice C. Principles of mineral processing. SME, 2003.

15- Mular, Andrew L., Doug N. Halbe, and Derek John Barratt. Mineral processing plant design, practice, and control proceedings. SME, 2002.

16- Yarar, Baki, and Z. M. Dogan. Mineral processing design. Vol. 122. Springer Science & Business Media, 1987.

17- Özgen, Canan. Production of heavy-media-quality magnetite concentrate from Kesikköprü iron ore tailings. Diss. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2010.

18- Koper, Edward Ludovicus. Sulphur Removal from Coal Or from Products: Is Prevention Better Than Cure?-a Techno-economic Review. Diss. University of the Witwatersrand, 2009.

19- Wilkes, K. D. "DEVELOPMENT AND RECENT APPLICATION. OF WEMCO HMS AND. FLOTATION CELLS."

20- http://www.hamkarmadan.com

21- http://www.flsmidthminerals.com