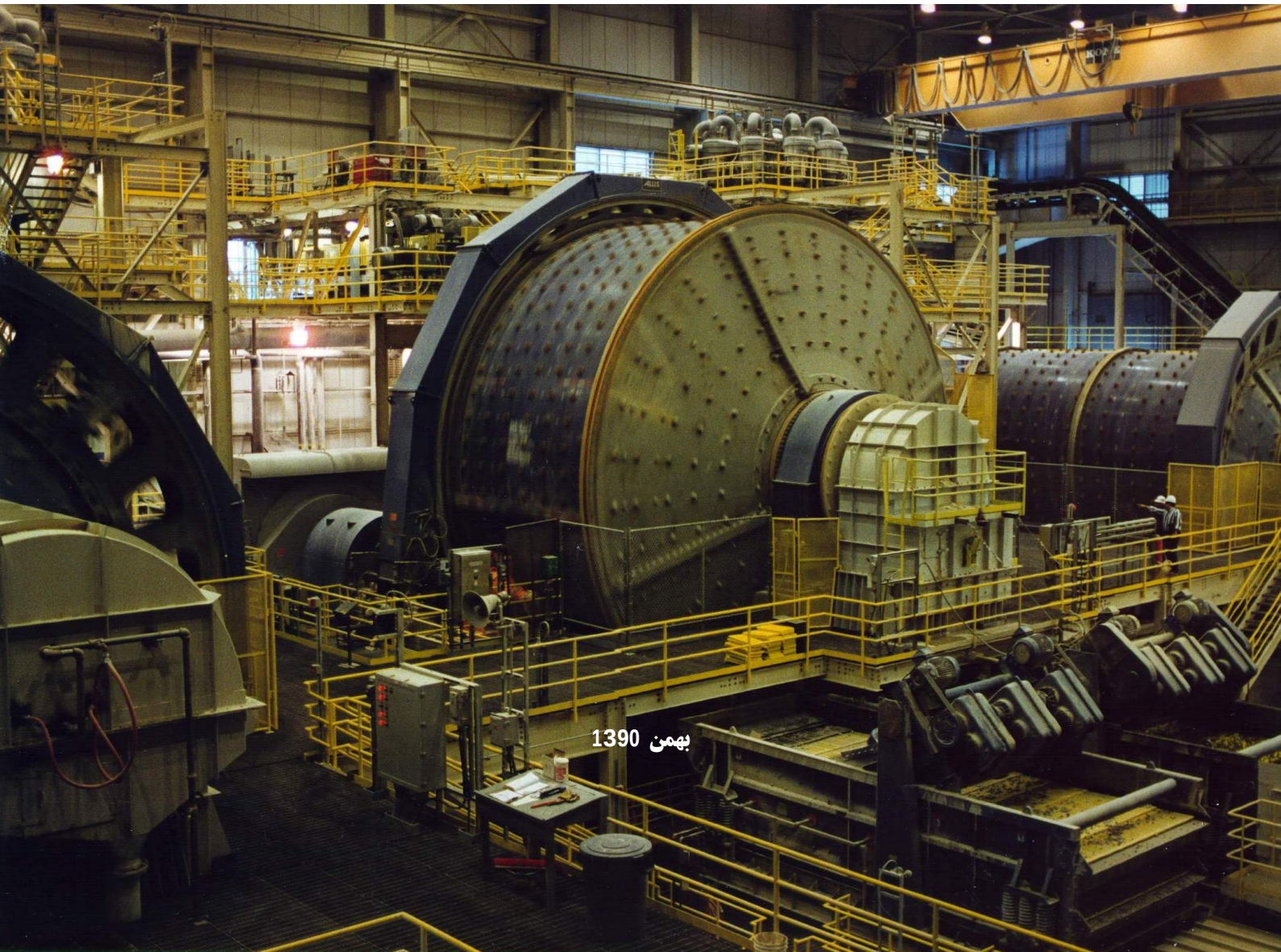
دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

جزوه درس

کانه‌آرایی

مدرس: دکتر علی احمدی



بهمن 1390

به نام خدا

نام درس: فرآوری مواد معدنی

نام مدرس: علی احمدی

زمان کلاس تئوری: دوشنبه ۱۲-۱۰

زمان آزمایشگاه:

گروه ۱: دوشنبه ۱۵:۳۰-۱۳:۳۰

گروه ۲: سه‌شنبه ۱۰-۸

گروه ۳: یک‌شنبه ساعت ۱۷:۳۰-۱۵:۳۰

زمان رفع اشکال و مشاوره دانشجویی: یکشنبه ۱۲-۱۰

دانشجویان می‌توانند در هر زمان سئولات خود را از طریق پست الکترونیکی به آدرس stu.minproc@gmail.com ارسال نمایند. در اسرع وقت به آنها پاسخ داده می‌شود.

اهداف درس:

هدف اصلی این درس:

- درک مفاهیم اساسی و آشنایی با روشهای کاربردی جداسازی محصولات با ارزش از منابع معدنی
- درک مکانیسمهای حاکم بر دستگاههای مختلف فرآوری مواد معدنی
- آشنایی با عملیات صنعتی و جنبه‌های مهندسی سیستم‌های فرآوری مواد معدنی

انتظار می‌رود تا در پایان درس، دانشجویان قادر باشند:

- اصول علمی و حنبه های مهندسی را در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی به کار گیرند.
- کارآیی دستگاههای مختلف فرآوری مواد معدنی را ارزیابی نماید.
- آزمایشهای فرآوری مواد معدنی را طراحی، هدایت و تفسیر نمایند.
- راه‌حل‌های مناسب را برای مسائل موجود در کارخانه‌های فرآوری ارائه دهند.
- متون انگلیسی در زمینه فرآوری مواد معدنی را مطالعه نمایند.

منابع درس:

منابع اصلی درس (تدریس بر اساس منبع ۱ می‌باشد.)

1. Wills, B. A., Napier-Munn, T.J., 2006. Mineral Processing Technology. Seventh Edition, Elsevier, England.
۲. حسین نعمت اللهی «کانه‌آرایی» جلدهای اول و دوم (چاپ چهارم)، انتشارات دانشگاه تهران، تهران ۱۳۸٤.

منابعی برای مطالعه بیشتر:

۳. **صمد بنیسی «مسائل کاربردی فرآوری مواد معدنی» انتشارات دانشگاه هرمزگان، تهران، ۱۳۸۹ (ضروری).**

4. Kelly, E. G., Spottiswood, D. J., 1989. Introduction to Mineral Processing. Mineral Engineering Services, Australia.
5. Pryor, E.J., 1983. Mineral Processing. Applied Science Publishers, London, UK.
6. Jain, S.K., 2001. Mineral Processing. CBS publisher, Second edition, New Dehli, India.
7. Gupta, A., Yan, D.S., 2006. Mineral Processing Design and Operations: An Introduction. Elsevier, Perth, Australia.
8. Abouzeid, A.Z.M., 1990. Mineral Processing Laboratory Manual. Trans Tech Publications. Clausthal-Zellerfeld, Germany.

۹. بهرام رضایی «تکنولوژی فرآوری مواد معدنی: خردایش و طبقه‌بندی» انتشارات نور، تهران، ۱۳۷۶.

۱۰. بهرام رضایی «تکنولوژی فرآوری مواد معدنی: پرعیارسازی ثقلی» انتشارات دانشگاه هرمزگان، تهران، ۱۳۷۷.

۱۱. بهرام رضایی «تکنولوژی فرآوری مواد معدنی: پرعیارسازی به روش مغناطیسی» انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۷۸.

۱۲. بهرام رضایی «فلوتاسیون» انتشارات دانشگاه هرمزگان، تهران، ۱۳۷۸.

13. Mular, A.L., Halbe, D., Barratt, D. (Eds.), 2002. Mineral Processing Plant Design, Practice and Control. Volumes 1&2, SME, Colorado, USA.
14. Bulatovic, S. M., 2007. Handbook of Flotation Reagents. Elsevier Science & Technology Books.

تذکرات:

تذکر۱: آوردن ماشین حساب در کلاس الزامی است.

تذکر ۲: کلاس جبرانی کلاسهای مقارن با تعطیلات در اسرع وقت تشکیل می‌گردد.

تذکر ۳: مهلت تحویل گزارش‌های آزمایشگاه و پاسخ تکالیف یک هفته می‌باشد.

تذکر ٤: پوشیدن روپوش در آزمایشگاه الزامی است.

تذکر ۵: پروژه درسی باید حداکثر تا ۲۵ اردیبهشت تحویل داده شود و در هفته اول خرداد ارائه گردد.

تذکر ۶: بازدید از کارخانه فرآوری در نیمه دوم اردیبهشت ماه انجام می‌شود.

تذکر ۷: ۳۰% از محتوای آزمون پایان‌ترم مربوط به مطالب بخش میان‌ترم می‌باشد.

نحوه ارزیابی:

تئوری (۲ واحد)		**آزمایشگاه (۱ واحد)**	
تکالیف	۲ نمره	گزارش‌ها و حضور	۱۲ نمره
کوییز	نمره اضافی	آزمون پایان‌ترم	٤ نمره
آزمون میان‌ترم	۵ نمره	بازدید از کارخانه	۲ نمره
پروژه درسی	۲ نمره	حضور فعال و نظم	۲ نمره
آزمون پایان‌ترم	۱۱ نمره		

تقویم درس فرآوری مواد معدنی

جلسه	موضوع
جلسه اول	مقدمه: آشنائی با فرآوری مواد معدنی و توجیه اقتصادی آن
جلسه دوم	بازدهی عملیات فرآوری مواد معدنی
جلسه سوم	محاسبات متالورژیکی و نمونه‌برداری
جلسه چهارم	موازنه جرم در مدارهای فرآوری مواد معدنی (بخش اول)
جلسه پنجم	موازنه جرم در مدارهای فرآوری مواد معدنی (بخش دوم)
جلسه ششم	تعیین مشخصه ذرات :اندازه ذرات، نمایش دانه‌بندی مواد، شکل ذرات و انواع سرندها
جلسه هفتم	اصول خردایش: مکانیزمهای خردایش، قوانین خردایش و کاربرد آنها
جلسه هشتم	عملیات خردایش: انواع سنگ‌شکنها و روش انتخاب سنگ‌شکنها
جلسه نهم	عملیات نرم کردن: انواع آسیاها، مکانیزم‌های نرم شدن مواد و آسترها
جلسه دهم	آزمون میان‌ترم
جلسه یازدهم	اصول و مکانیزم‌های طبقه‌بندی مواد: کلاسیفایرها و هیدروسیکلونها
جلسه دوازدهم	روشهای جدایش ثقلی مواد: تئوریهای جداکنندههای ثقلی
جلسه سیزدهم	جدایش با واسطه های سنگین
جلسه چهاردهم	فلوتاسیون
جلسه پانزدهم	روشهای جدایش مغناطیسی و الکتریکی: انواع ماشینها و کاربرد آنها، اصول و مکانیزمهای جداسازی،
جلسه شانزدهم	جداکردن فازهای جامد از مایع: ته‌نشین کردن مواد، تیکنرها و فیلتر کردن
جلسه هفدهم	انتقال مواد، سنگ‌جوری

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

فرآوری مواد معدنی

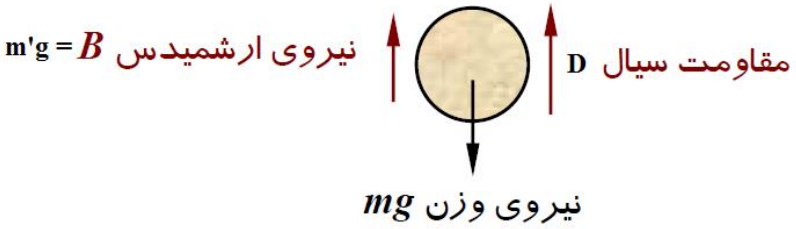
جلسه های دهم و یازدهم

اصول طبقه بندی

مدرس:
علی احمدی

1

نیروهای وارده بر یک جسم در حال سقوط درون سیال



شتاب سقوط اجسام در خلأ به جهت عدم مقاومت هوا مستقل از اندازه و دانسیته آنها می باشد.
در یک محیط ویسکوز مانند هوا و آب، مقاومت در برابر حرکت وجود دارد که مقدار آن با افزایش سرعت، افزایش می یابد.

۲

- طبقه بندی بر پایه سرعت سقوط ذرات در یک سیال

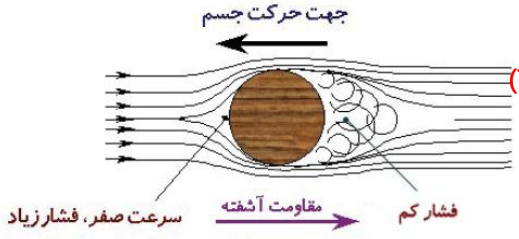
- سرعت ذرات در یک سیال نه تنها به اندازه آنها بلکه به وزن مخصوص و شکل آنها بستگی دارد.

- دریک محیط سیال مانند مقاومتی از طرف سیال بر جسم وارد می شود که مقدار آن متناسب با سرعت جسم است. درلحظه ای که نیروی وزن و نیروی مقاومت سیال معادل یکدیگر شوند، شتاب صفر می شود و ازآن لحظه به بعد جسم با سرعت ثابتی که سرعت حد نامیده می شود، به حرکت خود ادامه می دهد.

۳

مقاومت ویسکوزی (Viscous Resistance)

در سرعتهای پایین، چون لایه های سیال مماس بر جسم با آن حرکت می کنند، حرکت هموار (آرام) است. در واقع تمام مقاومت در مقابل حرکت از ویسکوزیته (اصطکاک) سیال ناشی می شود و مقاومت ویسکوزی نامیده می شود.

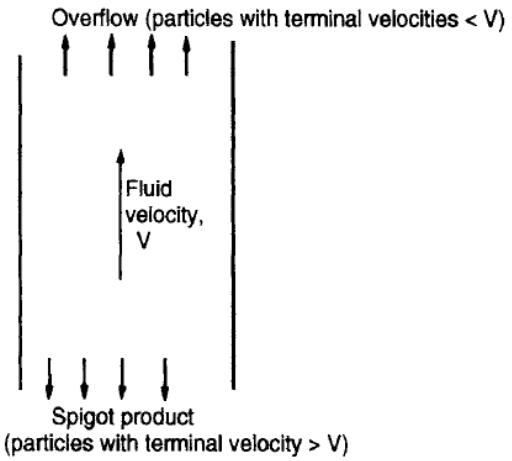


مقاومت آشفته (Turbulent Resistance)

در سرعتهای بالا مقاومت اصلی از جابجایی سیال توسط جسم و اختلاف فشار در جهت جریان ناشی می شود.

۴

مبنای جدایش در طبقه بندی کننده ها (Classifiers)



۵

ته نشینی آزاد:

هرگاه غلظت مواد جامد درداخل سیال در حدی باشد که ذرات آن درحین ته نشین شدن، به یکدیگر برخورد نکنند و مانع ته نشین شدن یکدیگر نشوند، ته نشینی در شرایط سقوط آزاد است. (درصد جامد کمتر از ۱۵٪)

معادله حرکت ذره جامد در سیال:

$$mg - m'g - D = \frac{m\,dx}{dt}$$

زمانی دانه به سرعت حد خود می رسد

$$dx/dt = 0$$

x: سرعت ذره
t: زمان
m: جرم ذره
m': جرم سیال هم حجم ذره
g: شتاب ثقل
D: مقاومت سیال

۶

$$D = (m - m')g$$

$$D = \left(\frac{\pi}{6}\right) g d^3 (D_s - D_f)$$

استوکس نیروی مقاومت برروی ذره را ناشی از مقاومت ویسکوز می داند که مقدار آن برابر است با:

$$D = 3\pi d \eta v$$

η: ضریب ویسکوزیته دینامیکی سیال (Ns/m2)
v: سرعت حدی ذره (m/s)

$$3\pi d \eta v = \left(\frac{\pi}{6}\right) g d^3 (D_s - D_f)$$

درنتیجه:

d: قطر ذره (m)
Ds: جرم مخصوص ذره (kg/m3)
Df: جرم مخصوص سیال (kg/m3)

$$v = \frac{g d^2 (D_s - D_f)}{18\,\eta}$$

۷

نیوتن نیروی مقاومت را عمدتا ناشی از مقاومت آشفته می داند که مقدار آن برابر است با:

$$D = 0.055\pi d^2 v^2 D_f$$

$$v = \left[\frac{3gd(D_s - D_f)}{D_f}\right]^{1/2}$$

حد فوقانی قانون استوکس توسط عدد بی بعد رینولدز تعیین شده است و معادل ۵۰ میکرون می باشد. قانون نیوتن نیز برای دانه هایی بزرگتر از ۵ میلیمتر صدق می کند.

۸

قانون استوکس برای یک سیال مشخص:

$$v = k_1 d^2 (D_s - D_f)$$

قانون نیوتن برای یک سیال مشخص:

$$v = k_2 [d(D_s - D_f)]^{1/2}$$

۹

دو ذره با سرعت حدی یکسان:

$$d_a{}^2 (D_a - D_f) = d_b{}^2 (D_b - D_f)$$

نسبت ته نشینی آزاد:

قانون استوکس:

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{D_b - D_f}{D_a - D_f} \right)^{1/2}$$

قانون نیوتن:

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{D_b - D_f}{D_a - D_f}$$

برای آنکه بتوان دو کانی سبک و سنگین را به روش ثقلی آرایش داد، باید بین جرم مخصوص آنها اختلاف قابل توجهی وجود داشته باشد.

۱۰

طبقه بندی مخلوطی از ذرات گالن و کوارتز:

برای ذرات ریز که از قانون استوکس پیروی می کنند.

$$\left(\frac{7.5-1}{2.65-1}\right)^{1/2}=1.99$$

برای ذرات درشت که از قانون نیوتن پیروی می کنند.

$$\frac{7.5-1}{2.65-1}=3.94$$

نتیجه: نسبت ته نشینی آزاد برای ذرات درشت که از قانون نیوتن پیروی می کنند بیشتر از ذرات ریز که از قانون استوکس پیروی می کنند است.

۱۱

- سرعت حد یک دانه در یک سیال مشخص فقط تابعی از ابعاد و چگالی آن دانه است.
- اگر چگالی دو دانه جامد با یکدیگر برابر باشد، سرعت حد دانه بزرگتر بیشتر است.
- اگر قطردودانه جامد با یکدیگر برابر باشد، سرعت حد دانه ای که چگالی آن بزرگتر است، بیشتر است.

۱۲

قانون کلی نسبت ته نشینی آزاد:

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{D_b - D_f}{D_a - D_f}\right)^n$$

برای ذرات ریز که از قانون استوکس پیروی می کنند: n=0.5

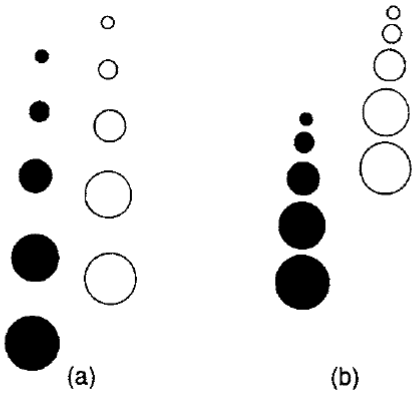
برای ذرات درشت که از قانون نیوتن پیروی می کنند: n=1

برای ذرات حد واسط ۵۰ میکرون و ۰/۵ سانتیمتر: n=0.5-1

۱۳

ته نشینی با مانع:

با افزایش غلظت جامد درسیال، تراکم دانه ها درمحیط بیشتر می شود و در نتیجه برخورد آنها به یکدیگر، سرعت ته نشینی کاهش می یابد که به این شرایط سقوط با مانع گفته می شود.



Classification by (a) free settling, (b) hindered settling

۱۴

در ته نشینی با مانع، مقاومت آشفته غالب است و برای تعیین سرعت حدی، شکل اصلاح شده نیوتن بکار می رود:

$$v = k[d(D_s - D_p)]^{1/2}$$

که در آن Dp دانسیته پالپ است.

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{D_b - D_p}{D_a - D_p}$$

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{7.5 - 1.5}{2.65 - 1.5} = 5.22$$

۱۵

انواع کلاسیفایرها

وسیله ای است که در آن مواد بر مبنای سرعت نسبی حرکتشان در یک سیال طبقه بندی می شوند.

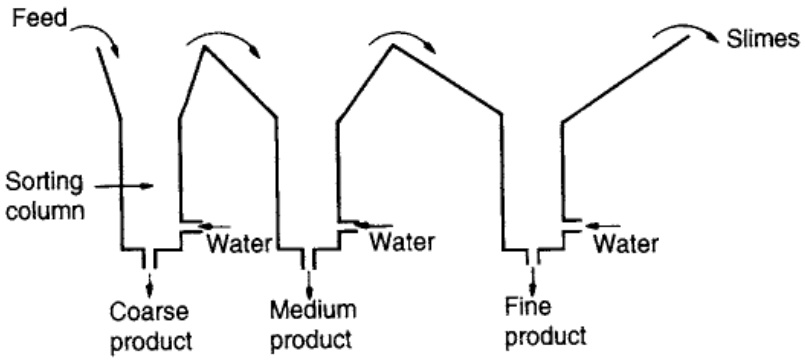
کلاسیفایرها بر اساس نوع جریان به دو دسته کلی تقسیم می شوند:

۱) کلاسیفایرهای با جریان عمودی، مانند کلاسیفایرهای هیدرولیکی که مکانیزم آنها ته نشینی با مانع بوده و دانسیته در جدایش تأثیر زیادی دارد.

۲) کلاسیفایرهای با جریان افقی، مانند کلاسیفایرهای مکانیکی که مکانیزم غالب در آنها ته نشینی آزاد بوده و تأثیر اندازه ذرات بارز است.

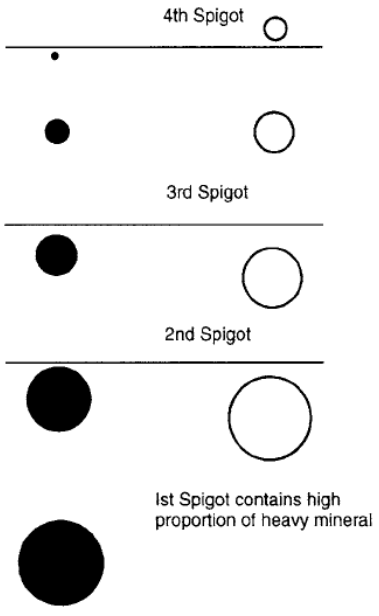
۱۶

کلاسیفایر قائم (Vertical Classifier)



سرعت جریان رو به بالای آب در هر ستون کمتر از ستون قبلی است. سطح مقطع بزرگتر از ستون قبلی است تا با وجود دبی بیشتر آب، سرعت رو بالای آب در حد مورد نظر باشد.

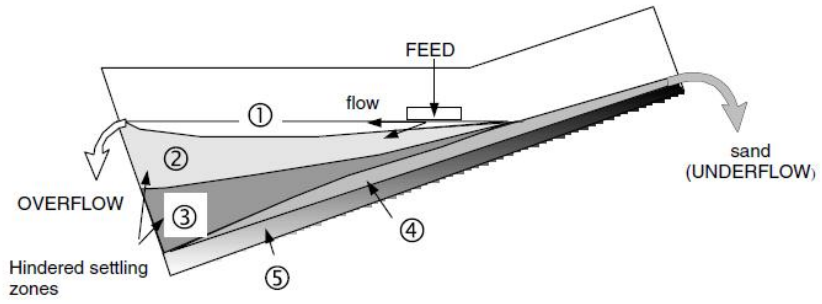
۱۷



Added increment of hindered-settling classifier

۱۸

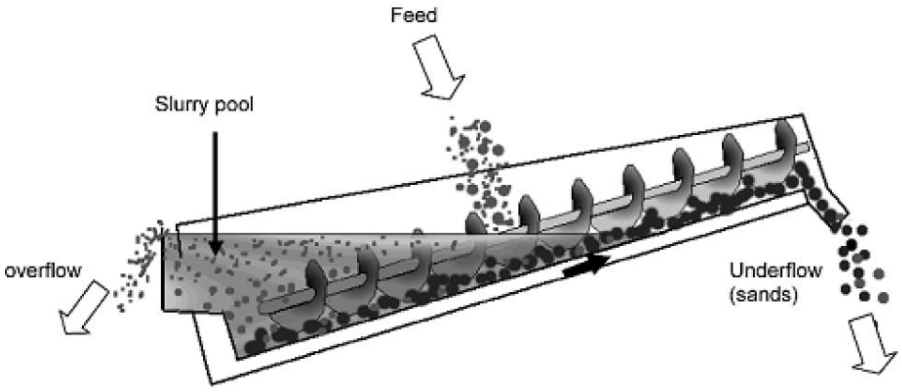
کلاسیفایر مارپیچی (Spiral Classifier)



Slurry movement and zones of particle separations in an operating classifier.

- ذرات با سرعت ته نشینی کم در مایع، به سرریز منتقل می شوند.
- ذرات با سرعت ته نشینی زیاد در ته ظرف رسوب می کنند و در جهت خلاف جریان آب توسط مارپیچ بالا کشیده می شوند.
- افزایش سطح شیب دار باعث افزایش بازدهی دستگاه و کاهش رقت ته ریز می شود. (برای طبقه بندی مواد تا حدود ۷۵ میکرون استفاده می شود.)

۱۹



- حرکت مارپیچ باعث آزاد شدن نرمه شده و از ورود آنها به خروجی بالا (ذرات درشت) جلوگیری می کند.
- هر چه طول مارپیچ بیشتر باشد، دقت جدایش افزایش می یابد

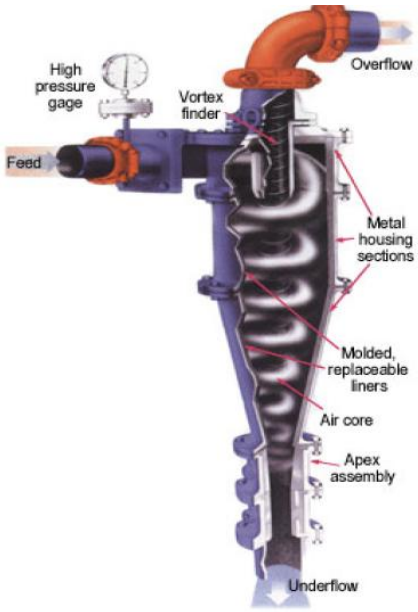
۲۰

هیدروسیکلون (Hydrocyclone)

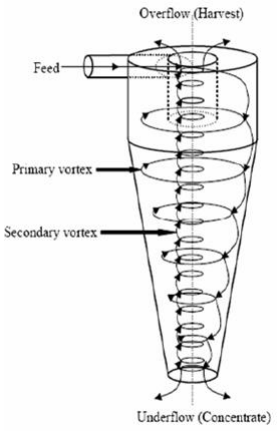
هیدروسیکلون مهم ترین وسیله برای طبقه بندی ذرات در ابعاد ریز در صنعت کانه آرایی است.

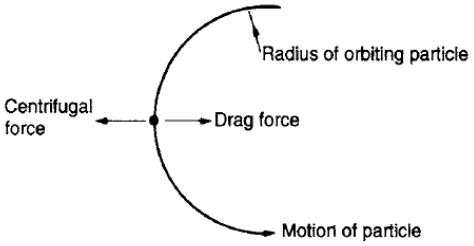
هیدروسیکلون وسیله ای استوانه ای- مخروطی است که پالپ حاوی ذرات دراندازه های متفاوت به طورمماسی وارد آن شده و طی حرکت دورانی پالپ و براساس نیروهای موثر (وزن - گریزازمرکز - مقاومت سیال) ذرات به دو دسته دانه درشت و دانه ریز تقسیم می شوند. مواد دانه ریز بیشتر تحت تاثیر نیروی مقاومت سیال قرارگرفته و به سمت لوله ای که در بالای هیدروسیکلون تعبیه شده است (دیافراگم) حرکت کرده و "سرریز" می شوند ولی ذرات درشت سنگین تحت اثر نیروی گریز از مرکز به سمت دیواره هیدروسیکلون رفته و به آن می چسبند و به دلیل تاثیر بیش از حد نیروی وزن و وجود محیط آرام، به سمت دهانه ته ریز حرکت می کنند.

۲۳



۲۴





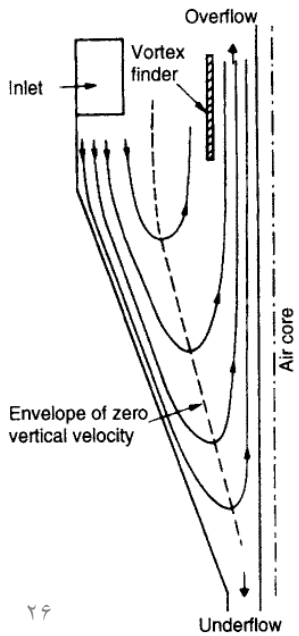
Forces acting on an orbiting particle in the hydrocyclone

ذرات با سرعت ته نشینی زیاد به سمت دیواره حرکت می کنند و از دهانه ته ریز بیرون می روند.

به دلیل عمل نیروی مقاومت سیال، ذرات با سرعت ته نشینی کم به سمت منطقه کم فشار در امتداد محور حرکت می کنند و به طرف بالا از طریق دیافراگم به سر ریز حمل می شوند.

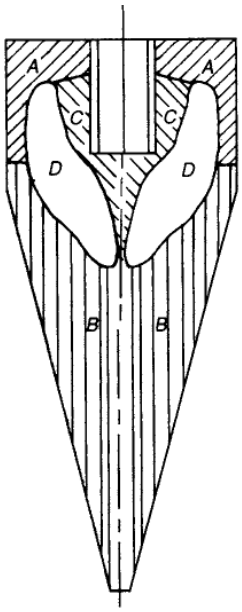
۲۵

توزیع مؤلفه های عمودی و شعاعی سرعت در داخل هیدروسیکلون



ذرات روی منطقه با سرعت عمودی صفر (Envelope of zero vertical velocity)، دارای احتمال مساوی برای انتقال به سرریز و یا خروج از ته ریز می باشند.

۲۶



ناحیه A: خوراک طبقه بندی نشده در این ناحیه باریک وارد شده و به دیواره و سقف سیکلون برخورد می کند.

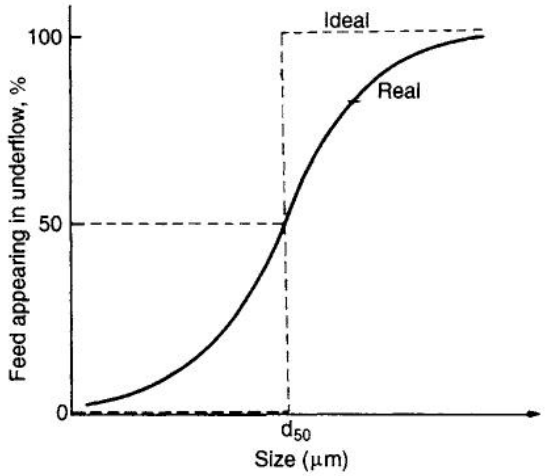
ناحیه B: قسمت خیلی بزرگی از مخروط سیکلون را اشغال می کند و حاوی تمامی ذرات درشت طبقه بندی شده می باشد.

ناحیه C: ذرات ریز دانه بندی شده در این ناحیه تجمع پیدا می کنند، ناحیه باریکی که از پیرامون دهانه سرریز (Vortex) شروع شده و نهایتاً در راستای محور سیکلون به طرف پایین کشیده می شود.

ناحیه D: عمل طبقه بندی تنها در این ناحیه انجام می شود. در عرض این ناحیه توزیع دانه بندی شعاعی می باشد، همانطور که ابعاد ذرات کاهش پیدا می کند فاصله شعاعی از محور کم می شود.

Regions of similar size distribution within cyclone

۲۷



کارآیی سیکلون
(Cyclone Efficiency)

متداولترین روش نمایش بازدهی جدایش سیکلون توسط منحنی جدایش می باشد.
حد جدایش، d50 (Cut point) یک سیکلون معمولاً بصورت نقطه ای روی منحنی جدایش که در آن ۵۰% ذرات به ته ریز منتقل می شود، مشخص می گردد.

حد جدایش در هیدروسیکلون اندازه ای است که احتمال حضور ذراتی با این اندازه، در هر دو جریان سرریز و ته ریز یکسان است.

۲۸

هرچه شیب قسمت میانی منحنی جدایش بیشتر باشد، کارآیی بالاتر است.

شیب منحنی با مشخص کردن نقاطی که در آنها ۷۵ % و ۲۵ % ذرات خوراک به ته ریز منتقل می شود، : می تواند بیان شود،

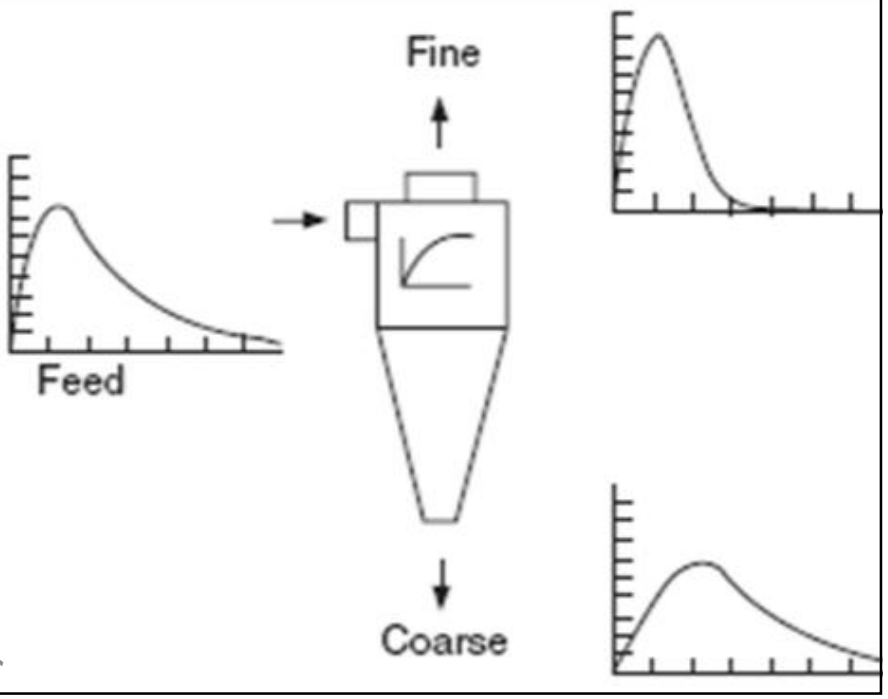
$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}}$$

I: ضریب نقص (Imperfection Coeficient) نامیده می شود.

در سیکلون ایده آل، ضریب نقص برابر با صفر است.

در آبی که به ته ریز منتقل می شود، ذراتی نیز بطور غیر انتخابی خارج می شود که معمولاً مقدار آن به نسبت آب منتقل شده خوراک به ته ریز فرض می شود.

۲۹



۳۰

مثال:

اگر مقدار مواد در یک دامنه اندازه معین در خوراک سیکلون شامل ۱۶ t/h و ۱۲ t/h آن به ته ریز منتقل شود، درصد انتقال این ذرات به ته ریز (بازیابی) چقدر خواهد بود؟

۳۱

تصحیح منحنی جدایش :

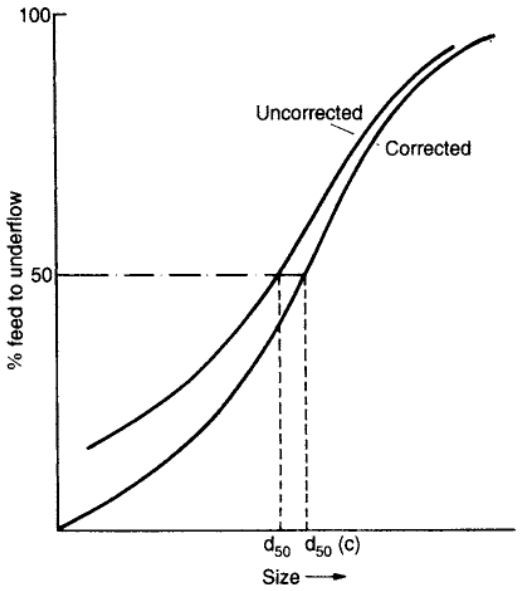
$$y' = \frac{y - R}{1 - R}$$

R: کسر آب خوراک منتقل شده به ته ریز

y': بازیابی تصحیح شده

y: بازیابی تصحیح نشده

۳۲



Uncorrected and corrected classification curves

۳۳

مثال:

فرض کنید یک سیکلون با کوارتز (دانسیته ۲۷۰۰ kg/m3) به شکل پالپ با دانسیته ۱۶۷۰ kg/m3 تغذیه می شود. دانسیته ته ریز ۱۸۹۰ kg/m3 و سرریز ۱۴۶۰ kg/m3 است. منحنی آنالیز ابعادی ورودی و خروجیهای سیکلون را ترسیم نمایید.

۳۴

(1) Size (μm)	(2) Wt %	(3)	(4) Wt % of feed	(5)	(6) Reconstituted feed	(7) Nominal size (arithmetic mean)	(8) % of feed to U/F
	U/F	O/F	U/F	O/F			
+1168	14.7	–	9.6	–	9.6	–	100.0
589–1168	21.8	–	14.2	–	14.2	878.5	100.0
295–589	25.0	5.9	16.3	2.1	18.4	442.0	88.6
208–295	7.4	9.0	4.8	3.1	7.9	251.5	60.8
147–208	6.3	11.7	4.1	4.1	8.2	177.5	50.0
104–147	4.8	11.2	3.1	3.9	7.0	125.5	44.3
74–104	2.9	7.9	1.9	2.7	4.6	89.0	41.3
−74	17.1	54.3	11.2	18.9	30.1	–	37.2
Total	100.0	100.0	65.2	34.8	100.0		

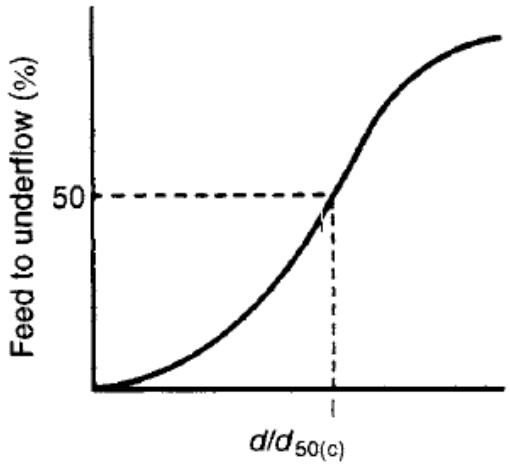
کسر آب خوراک در ته ریز:

$$R = \frac{65.2 \times 0.34}{100 \times 0.57} = 0.39$$

بازیابی تصحیح شده:

$$y' = \frac{y - R}{1 - R} = \frac{0.886 - 0.39}{1 - 0.39} = 0.813 = 81.3\%$$

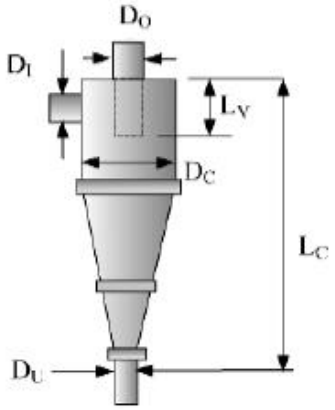
۳۵



Reduced efficiency curve

۳۶

عوامل مؤثر در کارآیی سیکلون



برای رسیدن به حد جدایش مطلوب پارامترهایی مانند ورودی خوراک، اندازه دیافراگم، دهانه ته ریز، فشار پالپ و نسبت رقت بایستی تنظیم شوند.

Hydrocyclone (Dewatering)	Hydrocyclone (Classifier)
Inlet diameter $D_I = D_C/4$	Inlet diameter $D_I = D_C/7$
Vortex finder diameter, $D_O = D_C/3$	Vortex finder diameter, $D_O = D_C/5$
Length or height, $L_C = 5\ D_C$	Diameter of underflow = $D_C/15$
Length of vortex finder, $L_V = 0.4\ D_C$	Length of vortex finder, $L_V = 0.4\ D_C$
	Length of cyclone $= 3\ D_C$

۳۷

محاسبه حد جدایش و دبی سیکلون از روابط پلیت (Plitt):

$$d_{50(c)} = \frac{14.8 D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_o^{1.21} \exp(0.063V)}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (S-L)^{0.5}}$$

D_i: قطر ورودی (cm)

$d_{50(c)}$: مقدار d_{50} تصحیح شده (μm)

D_u: قطر ته‌ریز (cm)

S: دانسیته جامد (g/cm^3)

L: دانسیته مایع (g/cm^3)

h: فاصله از ته دیافرگم (cm)

D_c: قطر داخلی (cm)

D_o: قطر دیافراگم (cm)

V: درصد حجمی جامد در خوراک

Q: دبی خوراک (m^3/h)

۳۸

$$Q = \frac{0.021P^{0.56}D_c^{0.21}D_i^{0.53}h^{0.16}(D_u^2 + D_o^2)^{0.49}}{\exp(0.0031V)}$$

برای مقاطع غیر دایره ای:

$$D_i = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

P: فشار *(kPa)* (۶/۸۹۵*kPa*=۱*psi*)

۳۹

محاسبه حد جدایش و دبی سیکلونها از روابط مولار (Mular):

برای سیکلونهای معمولی:

سطح ورودی = سطح محفظه خوراک × ۰/۰۷

قطر دیافراگم ٪۲۵ > قطر تەریز

قطر سیکلون ٪۴۰-۳۰ = قطر دیافراگم

$$d_{50(c)} = \frac{0.77D_c^{1.875}\exp\left(-0.301 + 0.0945V - 0.00356V^2 + 0.000068V^3\right)}{Q^{0.6}(S-1)^{0.5}}$$

$$Q = 9.4\times10^{-3}P^{0.5}D_c^2$$

۴۰

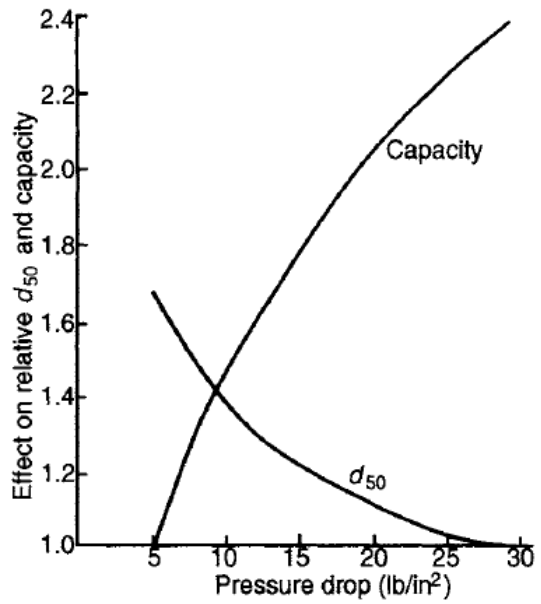
مثال:

یک آسیای نرم کننده اولیه با نرخ ۲۰۱/۵ t/h با کانه ای که دانسیته آن ۳/۷ g/cm3 است، تغذیه می شود. آسیا قرار است با سیکلونها در مدار بسته کار کند و نسبت بار در گردش ۳ و حد جدایش آن ۷٤ میکرون است. با فرض اینکه درصد جامد خوراک سیکلون ۵۰ و فشار سیکلون ۱۲ psi (۸۲/۷٤ kPa) باشد، اندازه و تعداد سیکلونهای مورد نیاز را محاسبه کنید.

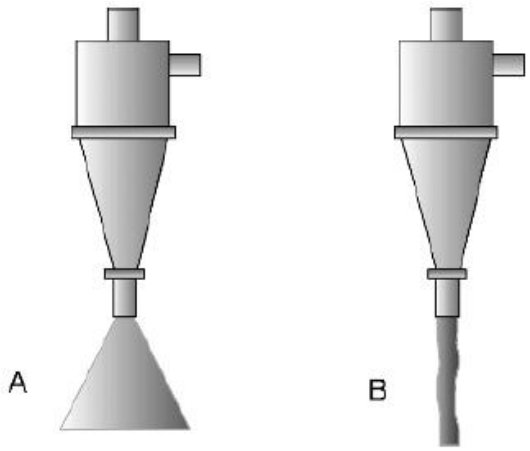
۴۱

- یکی از پارامترهای مهم سیکلون، افت فشار در آن (بین دهانه ورودی و خروجی سرریز) می باشد. توصیه می شود که هیدروسیکلون به نحوی تنظیم شود که فشار سرریز آن نزدیک فشار جو باشد. در اینصورت افت فشار، معادل افت فشار پالپ در دهانه ورودی است.
- افزایش در دبی خوراک یا فشار، نیروی گریز از مرکز را افزایش می دهد و در نتیجه ذرات ریز به ته ریز منتقل می شوند. به عبارت دیگر d50(c) کاهش می یابند.
- با افزایش درصد جامد پالپ، ته نشین شدن با مانع و مقاومت در برابر حرکت چرخشی بیشتر می شود و درنتیجه ذرات درشت به سرریز راه پیدا می کنند.
- برای جدایش در اندازه های ریز بایستی درصد جامد کم (کمتر از ۳۰ %) و فشار زیاد باشد.
- اساسی ترین پارامتر هیدروسیکلون قطر آن است و با افزایش آن حد جدایش افزایش می یابد.
- برای طبقه بندی ذرات ۱۵۰-۵ میکرون از هیدروسیکلون استفاده می شود.

۴۲

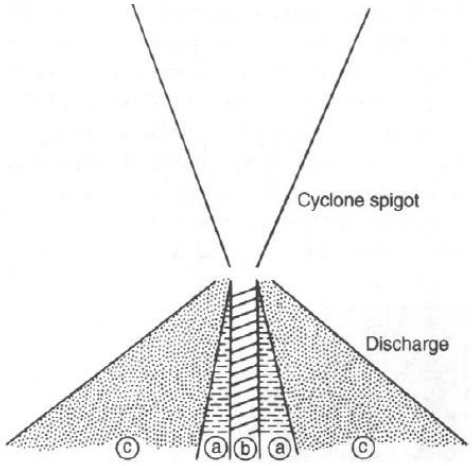


٤٣ Effect of pressure on capacity and cut-point of hydrocyclones



Hydrocyclone discharge. A - Normal spray discharge, B – rope discharge

٤٤

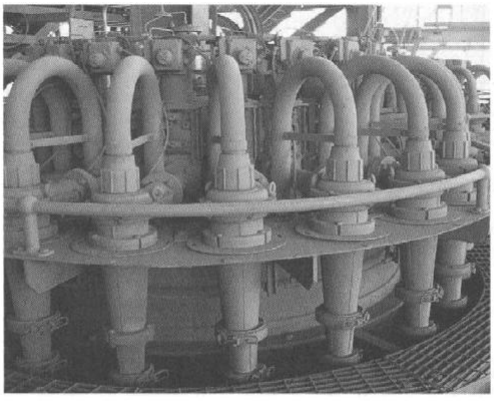


a: اگر عملیات بطور صحیح صورت گیرد، بوجود خواهد آمد . مخروط تشکیل شده با زاویه ° ۳۰-۲۰ خواهد بود

b: دهانه ته ریز کوچک باعث ایجاد طناب شدگی شده و غلظت پالپ خیلی زیاد می شود . از بین رفتن مغزه هوا باعث منتقل شدن ذرات درشت به سرریز می شود.

c: دهانه ته ریز بزرگ باعث رقیق شدن بیش از حد ته ریز می شود، در نتیجه مواد طبقه بندی نشده به همراه آب به ته ریز منتقل می شوند.

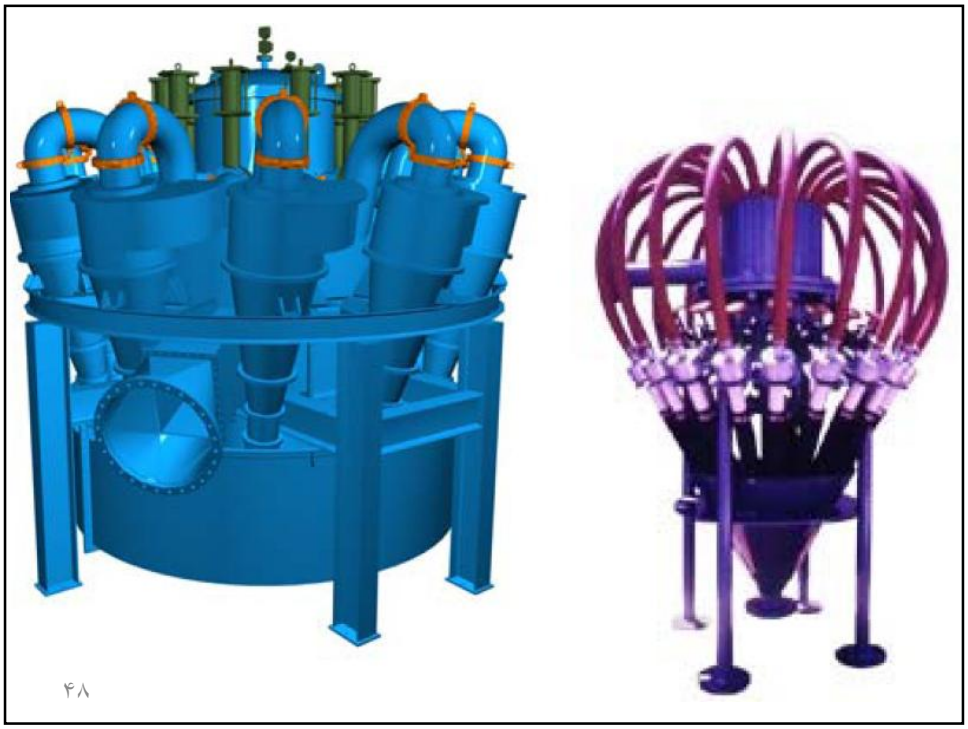
۴۵

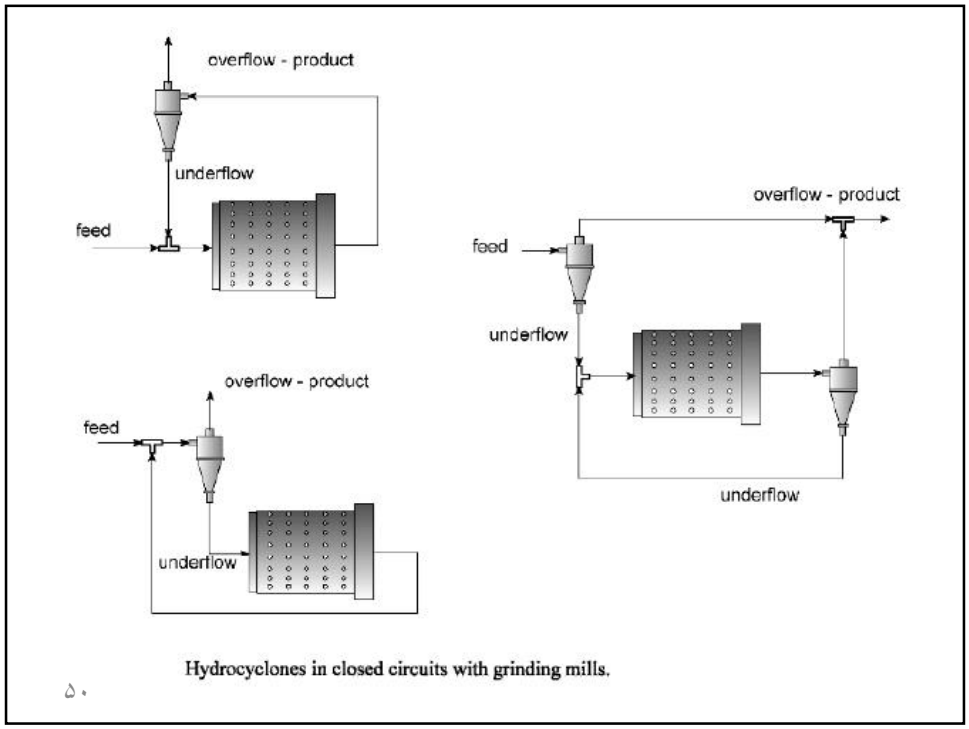


A nest of 150 mm cyclones at the Century Zinc mine, Australia (Courtesy JKMRC and JKTech Pty Ltd)

برای بالا بردن ظرفیت از چند سیکلون بطور موازی استفاده می شود. در این سری سیکلونها، زاویه قرار آنها عمودی نیست. این کار به دو دلیل انجام می شود: بالا بردن کارآیی و هدایت آسانتر مواد ته ریز به خروجی نهایی.

۴۶





Hydrocyclones in closed circuits with grinding mills.

٥٠

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

فرآوری مواد معدنی

جلسه دوازدهم

پر عیار کردن ثقلی

(Gravity Concentration)

مدرس:
علی احمدی

51

روش پرعیار سازی ثقلی بر مبنای حرکت نسبی ذرات در یک سیال است.
نیروی ثقل، نیروی مقاومت سیال و نیروی گریز از مرکز از موثرترین نیروها هستند.
علاوه بر جرم مخصوص، وزن، شکل، ابعاد ذرات و همچنین نیروی مقاومت سیال از پارامتر های مهم در تعیین حرکت نسبی ذرات در این فرآیند هستند.

استفاده از این روش در مراحل اولیه عملیات باعث کاهش وزن ماده برای عملیات بعدی در اثر کنار گذاشتن مقدار زیادی از باطله می شود.

شاخص پرعیار سازی

$$C.C = \frac{\sigma_{H.p} - \sigma_f}{\sigma_{L.p} - \sigma_f}$$

$\sigma_{H.p}$، *دانسیته ذره سنگین* $\sigma_{L.p}$ *دانسیته ذره سبک و* σ_fدانسیته سیال است .

برای جداسازی مؤثر بایستی تفاوت بارزی بین دانسیته کانی با ارزش و گانگ وجود داشته باشد.

۵۲

شرایط جدایش ثقلی با توجه به ابعاد ذرات نسبت به شاخص پرعیارسازی

شاخص پرعیار سازی	محدوده ابعادی لازم و کیفیت جدایش
بزرگتر از ۲/۵	جدایش حتی برای ذرات ریزتر از 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.
کوچکتر از ۱/۲۵	به جز موارد خاص امکان پذیر نیست.

۵۳

برای بالا بردن کارآیی پرعیارکننده های ثقلی، ذرات بایستی تا حد امکان درشت و یک اندازه باشند .

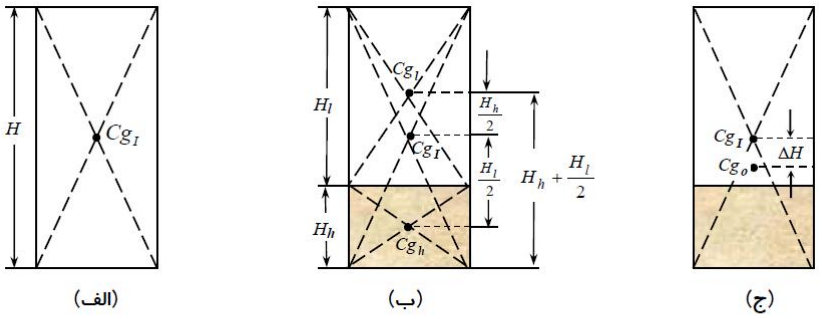
برای کم کردن تأثیر دانسیته در جداسازی ذرات بر حسب اندازه، بهتر است از سرند بجای سیکلون استفاده شود.

جدایش ذرات در یک جدا کننده ثقلی به نرخ ته نشینی آن ذره در محیط سیال بستگی دارد.

۵۴

- بستر مخلوطی از ذرات با دانسیته مختلف دارای انرژی پتانسیل معین است. وقتی چنین بستری حرکت داده شود، ذرات بنحوی قرار می گیرند که سیستم کمترین انرژی پتانسیل را داشته باشد .
- لایه بندی ذرات به صورتیکه ذرات با دانسیته زیاد در پایین و ذرات با دانسیته کم در بالا قرار می گیرند به این علت است.
- انرژی اعمال شده برای به حرکت در آوردن ذرات، نقش مستقیم در طبقه بندی ذرات ندارد، بلکه باعث آزاد شدن انرژی پتانسیل ذخیره شده در ذرات مخلوط می شود.

۵۵



(الف) (ب) (ج)

وضعیت مرکز ثقل در یک سیستم دو جزئی متشکل از مواد با دانسیته پایین و دانسیته بالا
(الف) قبل از لایه‌بندی، (ب) بعد از لایه‌بندی و (ج) پایین آمدن مرکز ثقل

h: اندیس ذرات با دانسیته زیاد
Cg: مرکز ثقل
I: حالت ابتدا
l: اندیس ذرات با دانسیته کم
O: حالت نهایی

۵۶

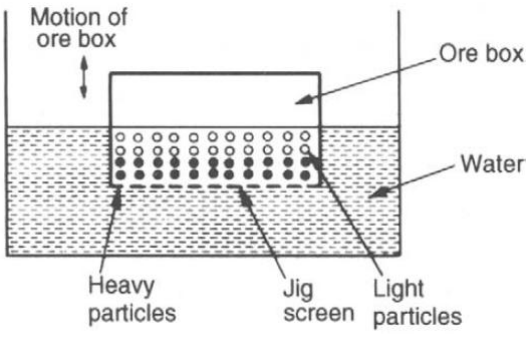
جداکننده های ثقلی (Gravity Separators)

- جیگ
- ناو شستشو
- مخروط
- مارپیچ
- میز نرمه

۵۷

جیگ

قدیمی ترین روش پرعیارکننده های ثقلی است و برای پرعیارکردن مواد نسبتاً درشت (بزرگتر از 150 میکرون) به کار می رود.

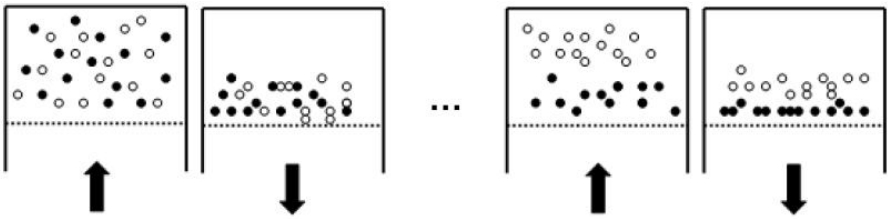


Hand jig

۵۸

اصول حرکت ذرات در جیگ

کنترل لایه بندی در جیگ در اثر چهار مکانیزم انجام می گیرد که به ترتیب شامل شتاب دیفرانسیلی در شروع سقوط، سقوط با مانع، دستیابی به حد اقل انرژی پتانسیل و چکیده شدن ذرات است.



۵۹

معادله حرکت دانه های جامد در یک سیال:

$$m\,\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = mg - m'g - D$$

m: جرم ذره

m': جرم آب جابجا شده هم حجم ذره

D: مقاومت سیال

dx/dt: شتاب دیفرانسیلی

نیروی مقاومت سیال D، تابعی از سرعت حرکت ذره است. اگر در شروع حرکت که سرعت ذره خیلی کم است نیروی مقاومت سیال را ناچیز بگیریم:

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = \left(\frac{m - m'}{m}\right) g$$

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = \left(\frac{D_s - D_f}{D_s}\right) g \quad = \left(1 - \frac{D_f}{D_s}\right) g$$

بنابراین، شتاب اولیه ذرات مستقل از اندازه ذره و فقط به دانسیته جامد و سیال وابسته می باشد (به شرطی که سرعت کم باشد).

۶۰

در جیگ ها سعی می شود که زمان سقوط به قدری کوتاه باشد که مسافت طی شده توسط ذرات بیشتر از شتاب اولیه تأثیر بپذیرد.

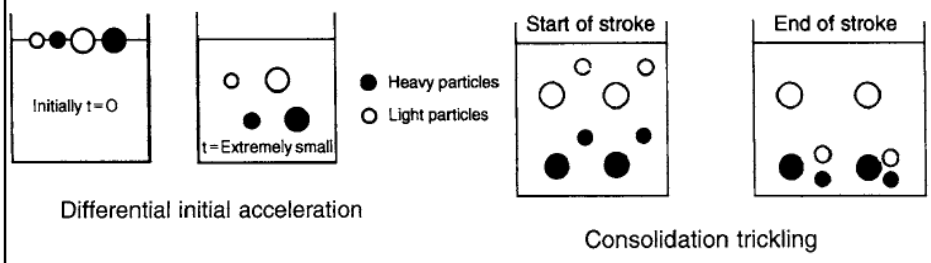
با افزایش سرعت ذرات و نزدیک شدن آن به سرعت حد، مقاومت سیال که خود تابعی از ابعاد ذرات است، افزایش می یابد و بر روی حرکت ذرات تأثیر می گذارد. در این حالت تنها می توان ذرات با ابعاد درشت کانی سنگین یا دانه های کوچک سبک را از بقیه جدا کرد.

روشهای ثقلی مانند جیگ، میز، و دیگر جریان های نازک لایه ای و واسطه سنگین در شرایط سقوط با مانع کار می کنند.

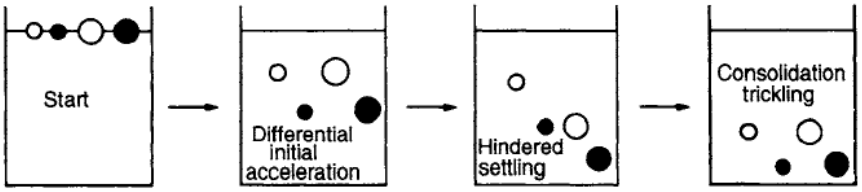
۶۱

چکیده شدن دانه ها:

با توجه به لایه ای بودن مواد در سطح جیگ، علاوه بر فرکانس، دامنه نوسان نیز بر عملکرد جیگ تأثیر می گذارد و هر چه کوتا هتر باشد فاصله طی شده توسط ذره کمتر خواهد بود و یا به عبارتی زمان ته نشینی کم می شود. اگر این زمان از زمان تناوب نوسانهای جیگ کمتر باشد، دانه های کوچک کانی سنگین فرصت خواهند داشت که در لایه ای که در شرایط مشابه روان است نفوذ کرده، به سمت پائین حرکت کنند. این عمل چکیده شدن دانه ها نام دارد. بدیهی است که حرکت ذرات در این حالت سقوط با مانع خواهد بود.

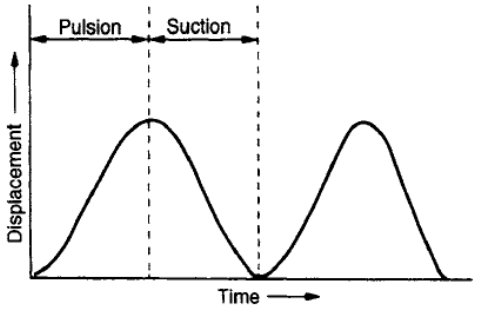


۶۲



Ideal jigging process

۶۳



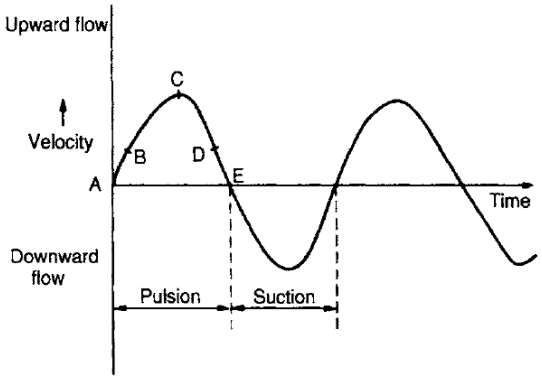
Movement of the piston in a jig

در مرحله حرکت جهشی لایه ای متشکل از ماده معدنی به صورت یکپارچه بالا می رود. سپس با کاهش سرعت، این لایه تمایل به انبساط پیدا می کند تا بالاخره تمام لایه حرکت رو به پائین پیدا می کند. در مرحله ی کشش این لایه مجدداً فشرده می شود.

در انتهای حرکت جهشی وقتی لایه شروع به فشرده شدن می نمایند، دانه های درشت به یکدیگر برخورد کرده، دانه های کوچک تحت نیروی وزنشان از بین آنها به سمت پائین حرکت می کنند که به این پدیده چکیده شدن می گویند. ۶۴

سرعت رو به بالای جریان از نقطه A شروع میشود. با افزایش تدریجی سرعت، دانه های جامد آزادتر شده لایه منبسط می شود.

در نقطه B دانه ها در مرحله ته نشینی با مانع در یک جریان رو به بالا هستند. در این مرحله دانه های ریز توسط جریان رو به بالای آب به سمت بالا حرکت می کنند، لذا ممکن است همراه مواد باطله خارج شوند.



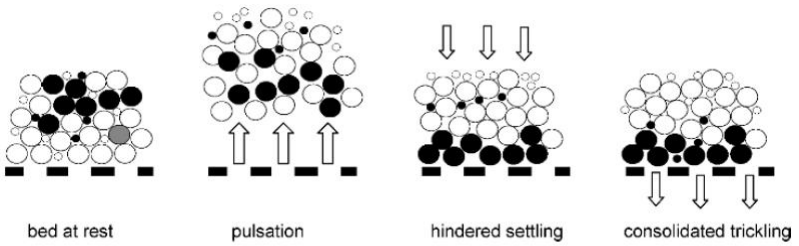
Speed of flow through bed during jig cycle

در نقطه C: تمام ذرات حرکت رو به بالا دارند سرعت جریان به حداکثر خود رسیده و از آن پس سرعت شروع به کم شدن می کند.

در نقطه D: ابتدا دانه های درشت و سپس دانه های ریز باقی مانده شروع به ته نشینی می کنند. که در اینجا ته نشینی حالت با مانع دارد.

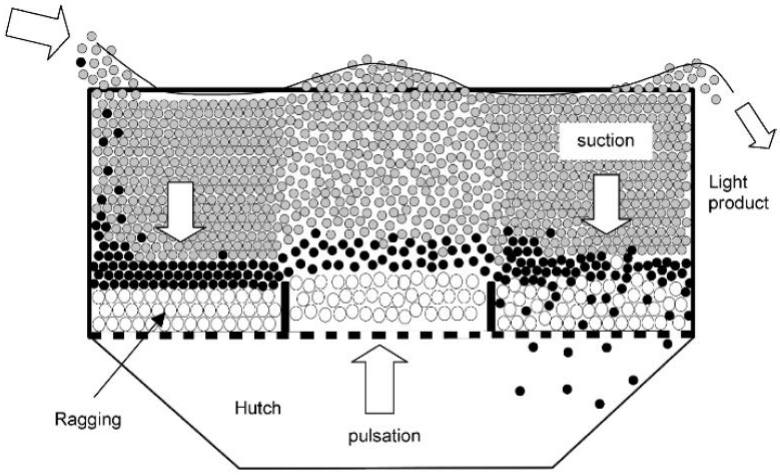
در نقطه E بستر به طور کامل فشرده می شود و ذرات چکیده می شوند.

۶۵



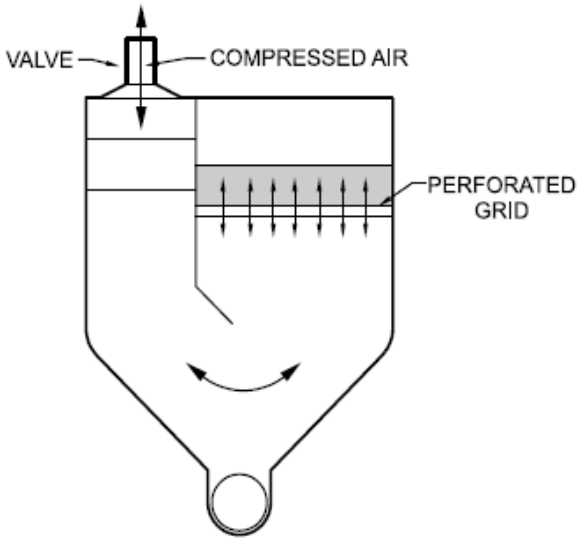
Expansion and contraction of a bed of particles due to jigging action.

۶۶

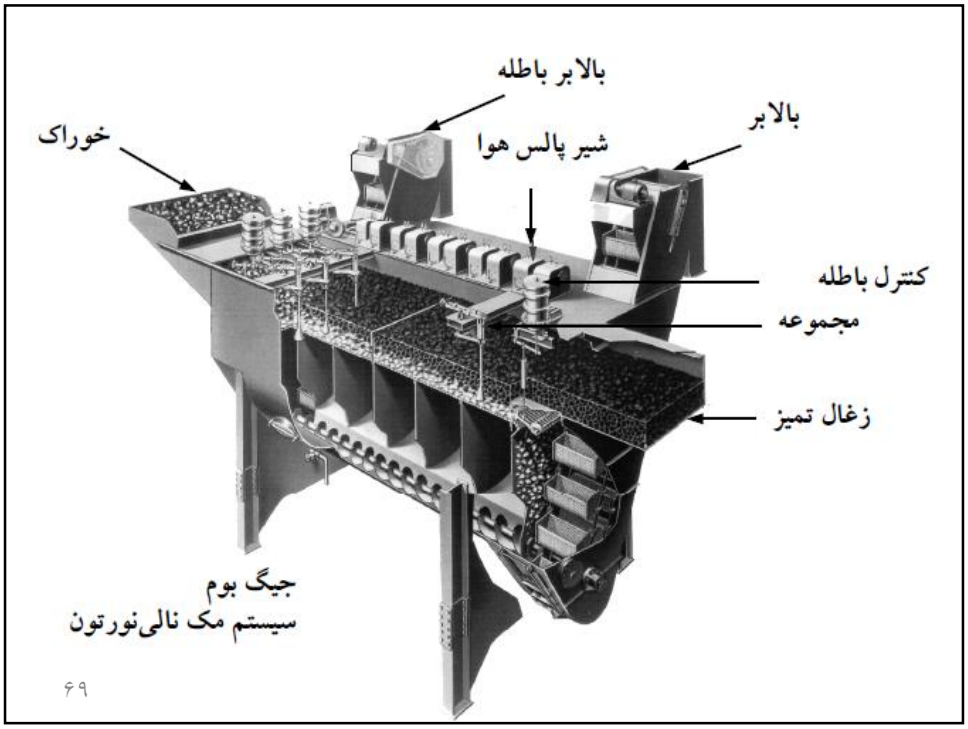


Jigging through the screen.

٦٧

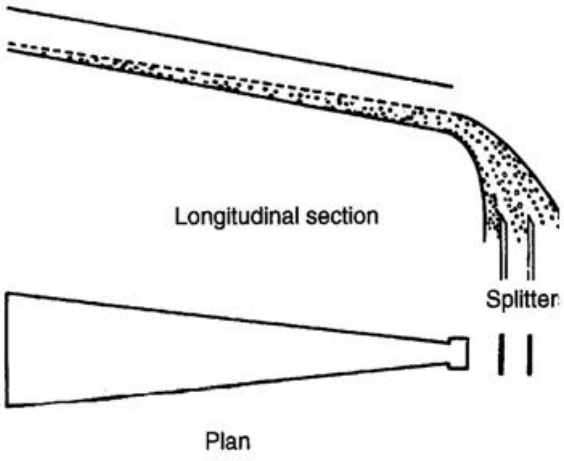


٦٨



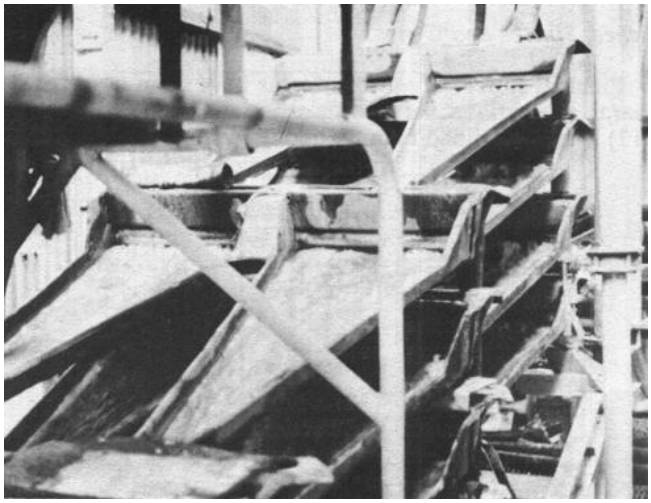
ناو شستشو (Pinched Sluices)

یک ناو شستشوی شیبدار، طولی در حدود 1 متر را دارد که عرض ورودی آن در حدود 25 سانتیمتر و عرض خروجی آن در حدود 2/5 سانتیمتر است.



در دهانه خروجی ناو، از سطح پالپ تا کف، دانسیته ذرات بیشتر می شود.

۷۰



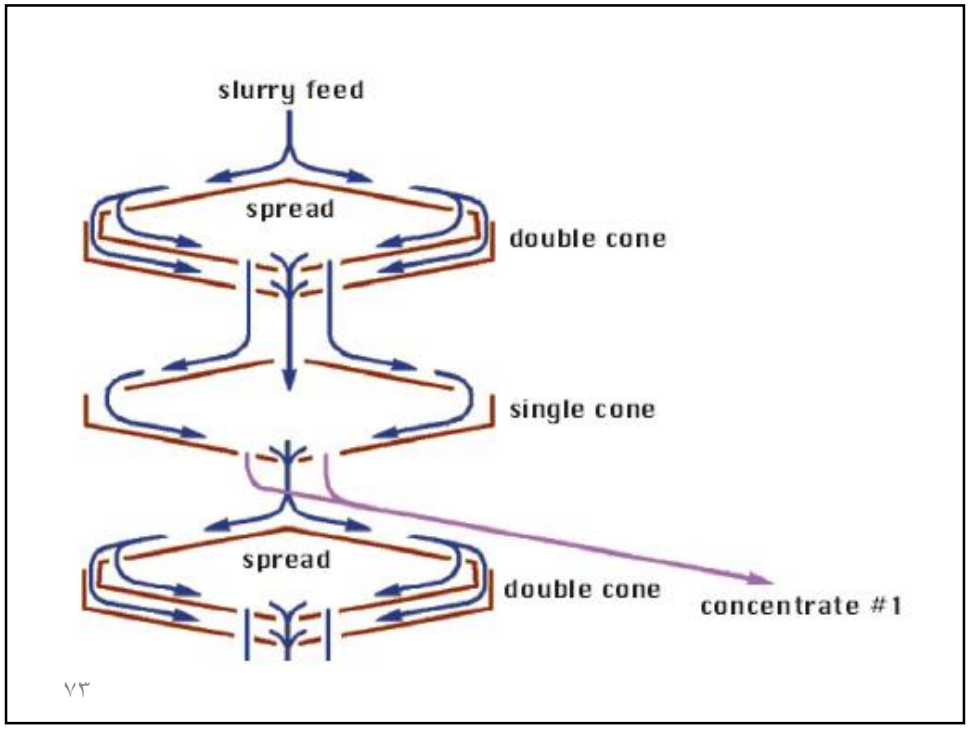
پالپ با درصد جامدی معادل 60-50% به آرامی وارد شده و همچنانکه پایین می رود و لایه لایه می شود در خروجی این لایه ها توسط جداکننده ها، بصورت مجزا از هم، جمع آوری می شوند.

مخروط (Cone)

جدا کننده های مخروطی در واقع از کنار هم قرار گرفتن تعداد زیادی ناو شستشو با عرض کم تشکیل شده اند که در آن جریان پالپ محدود نیست.

از محسنات این سیستم می توان به جریان یکنواخت پالپ، سهولت جریان و ظرفیت زیاد اشاره کرد.

بهترین کارآیی در دامنه اندازه ذرات 600-100 میکرون است.


slurry feed
spread
double cone
single cone
spread
double cone
concentrate #1
٧٣

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

فرآوری مواد معدنی

جلسه های سیزدهم

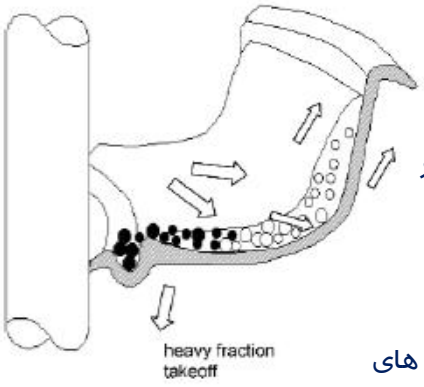
ادامه روشهای ثقلی و جدایش توسط واسطه سنگین

مدرس:
علی احمدی

1

مارپیچ ها (Spirals)

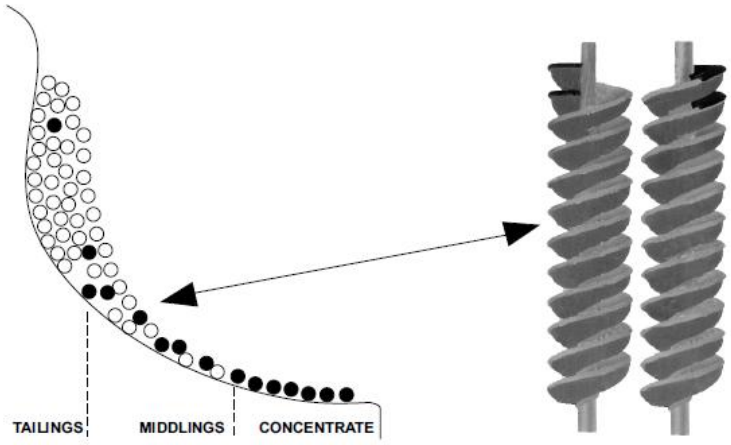
بار اولیه با ابعادی حدود 3 میلیمتر تا 75 میکرون به صورت پالپی با غلظت 15 تا 45 % جامد از قسمت بالای مارپیچ وارد آن می شود.



ذرات به دلیل اثر ترکیبی نیروی گریز از مرکز، سرعتهای مختلف ته نشینی ذرات و تأثیر چکیدن ذرات در بین فضا های لایه، بصورت لایه بندی در می آیند.

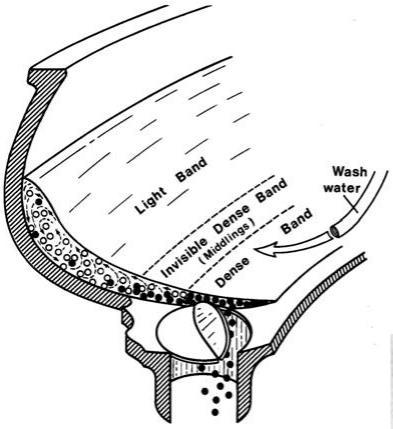
این جدا کننده ها برای پرعیارسازی ماسه های دارای کانیهای سنگین (ایلمنیت) بکار می رود.

۲



مقطع جداکننده ثقلی‌مارپیچی

۳



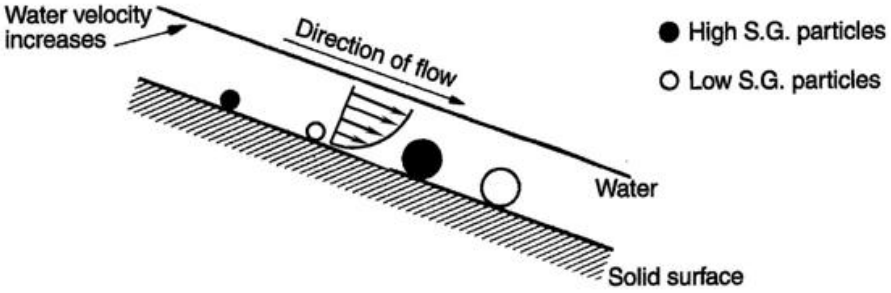
نوع کم شیب مارپیچ برای کارهای دقیق تر مثل جدا کردن کانیهایی که اختلاف دانسیته کمتری دارند.
نوع پرشیب دارای ظرفیت و بازیابی بیشتری است.

4

در مرحله رافر حدود پنج پیچ دارند ولی تعداد پیچ ها در مرحله شستشو کمتر می شود.

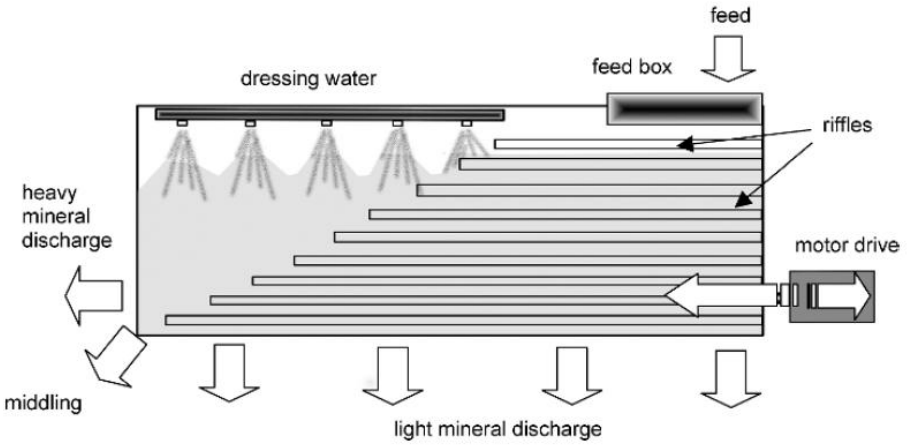
5

سرعت جریان در یک لایه جاری روی سطح صاف با دور شدن از سطح زیادتر می شود. اگر در این لایه ذرات با اندازه های مختلف وارد شوند، به ذرات بزرگتر بیش از ذرات کوچکتر نیرو وارد می شود، در نتیجه این عامل باعث جدا شدن آنها می شود.



۶

میز لرزان (Shaking Tables)



Shaking table arrangement.

از میز لرزان برای آرایش مواد نسبتاً دانه ریز و گاهی آرایش نهایی موادی که به سایر روشهای ثقلی پر عیار شده اند استفاده می شود.

۷

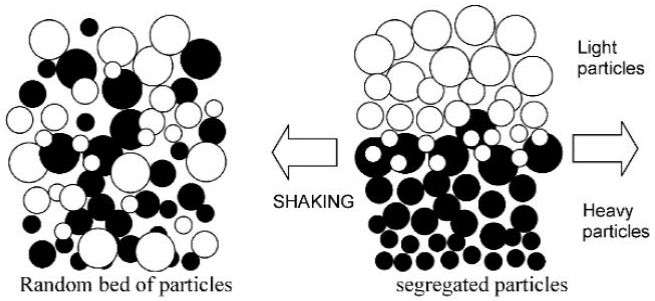
میز با شیب کم در جهت طولی به لرزش درآورده می شود به طوری که ضربه جلو رونده آرام ولی برگشت آن خیلی سریع است. این کار باعث می شود ذرات در جهت طولی میز بغلتند.

پالپ وارد شده به میز تحت تأثیر دو نیرو قرار می گیرد. یکی نیروی ناشی از حرکت نوسانی میز در جهت طول آن و دیگری ناشی از حرکت لایه نازک آب در امتداد خط بزرگترین شیب میز و عمود بر امتداد حرکت میز (جهت جریان آب) که برآیند این دو نیرو باعث حرکت ذرات در امتداد قطر میز خواهد شد. چون بیشترین تأثیر جریان لایه نازک آب به ابعاد و چگالی دانه ها بستگی دارد، در نتیجه دانه های کوچکتر و سنگین تراز موانع عبور می کنند و از ذرات سنگین جدا می شوند.

ذرات کوچک با دانسیته بیشتر به سمت ناو کنسانتره و ذرات بزرگ سبک به سمت ناو باطله شسته می شوند.

هر چه باروردی به میز دانه ریز تر باشد، باید فرکانس را بیشتر دامنه را کوتاهتر کرد و در حالت بار ورودی دانه درشت بر عکس این خواهد بود.

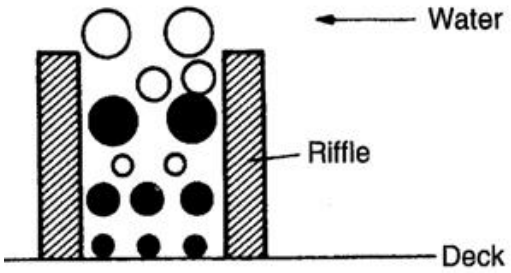
۸



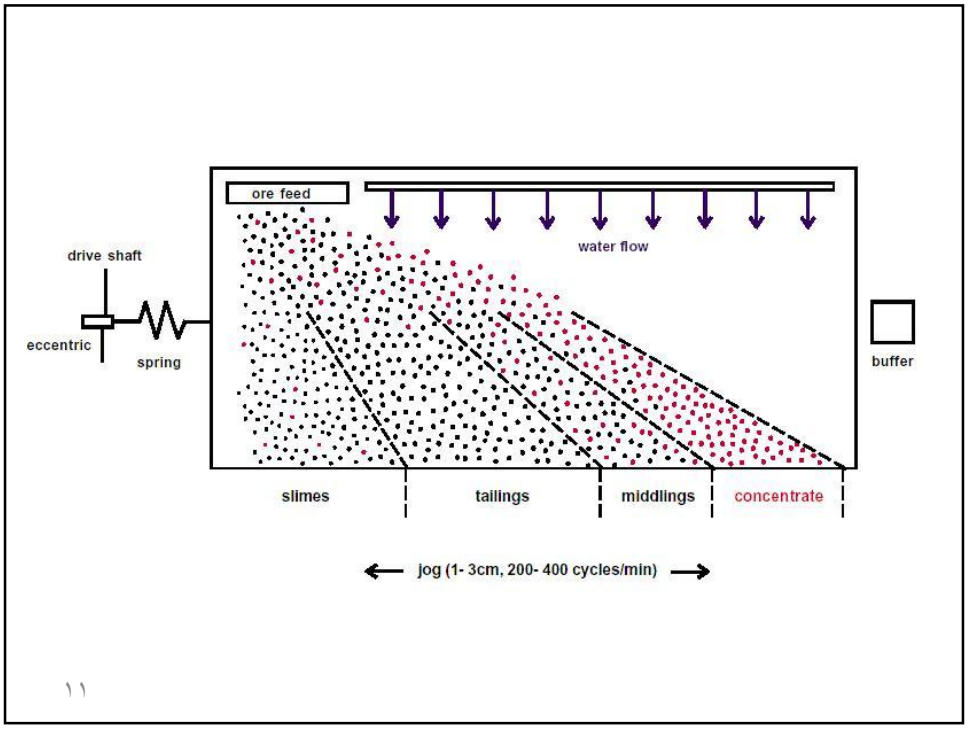
Segregation of particles due to horizontal shaking motion.

۹

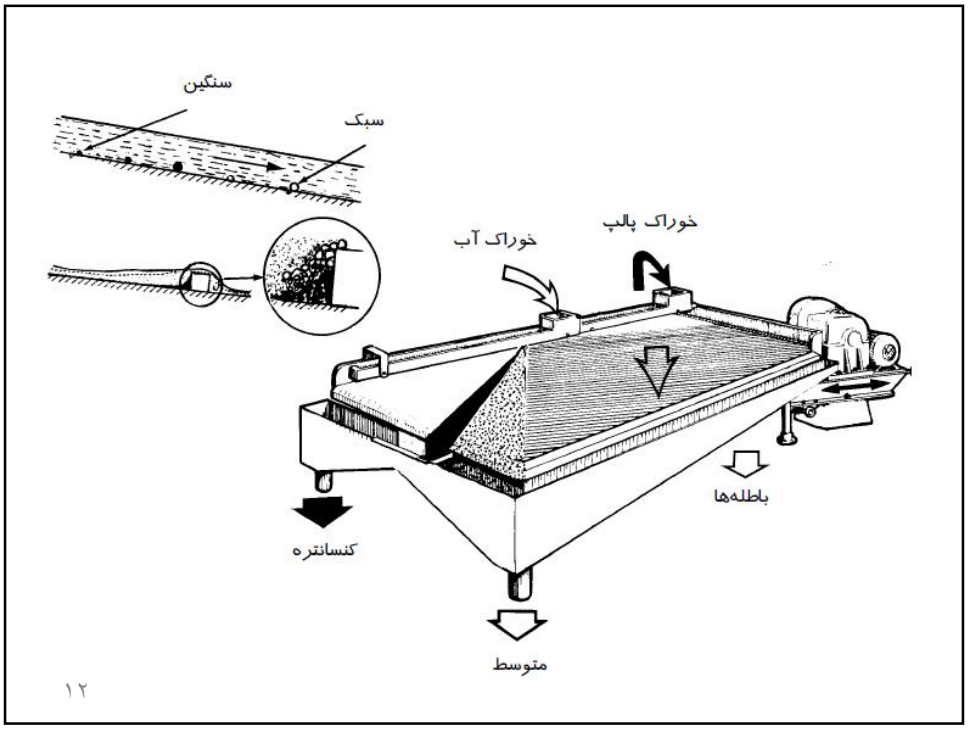
لایه بندی مواد بین دو مانع



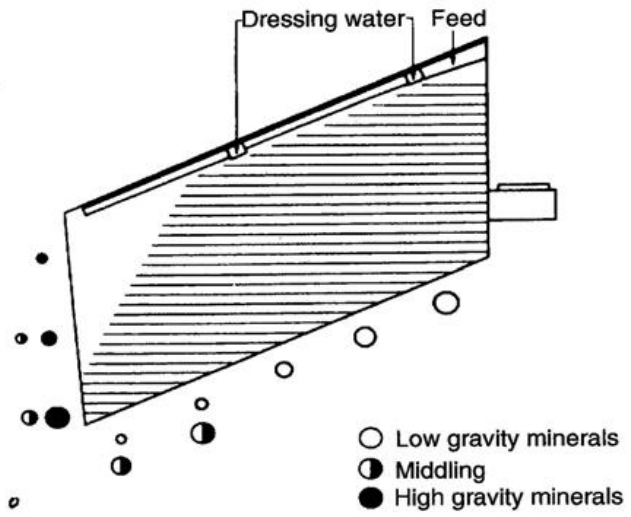
۱۰


ore feed
water flow
drive shaft
eccentric
spring
buffer
slimes
tailings
middlings
concentrate
jog (1- 3cm, 200- 400 cycles/min)

۱۱

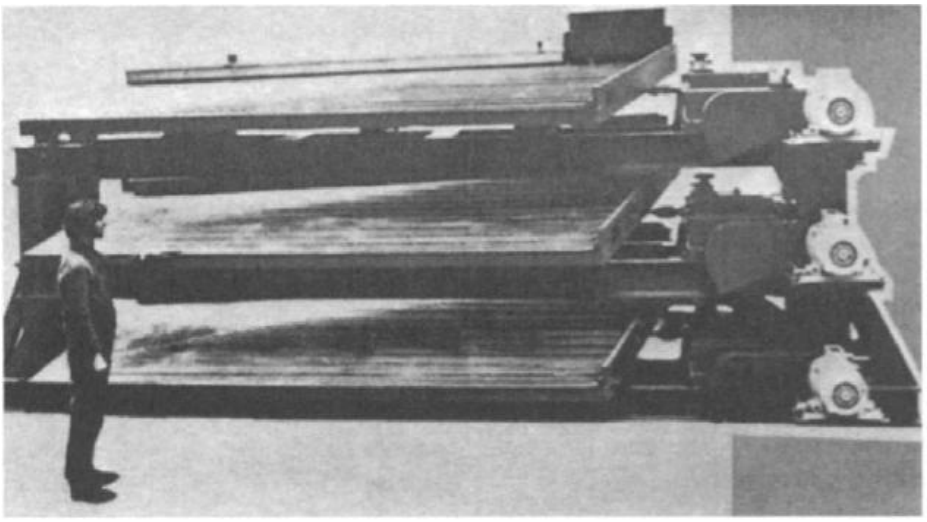

سنگین
سبک
خوراک آب
خوراک پالپ
باطله‌ها
کنسانتره
متوسط

۱۲

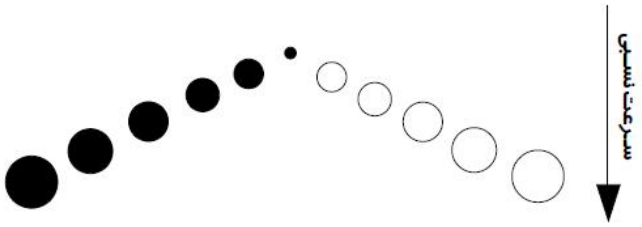


ریزترین و سنگین ترین ذرات در ته و درشت ترین و سبک ترین در بالای مانع قرار می گیرد.

۱۳



۱۴



وسیله	دامنه اندازه ذرات	کاربرد نمونه
جیگ‌های زغال	40 – 200 mm (1,6 - 8")	زغال
جیگ‌های کانی	- 6 mm ($3^1/_2$ mesh)	طلا، کرومیت، گالن
مارپیچ ها	- 1,0 mm light, (16 mesh)	زغال، ماسه‌های ساحلی، آهن
	-0,5 mm heavy, (32 mesh)	کاستیریت
میز لرزان	- 3 mm (7 mesh)	قلع ، مس ، طلا و سرب ، روی و تنگستن

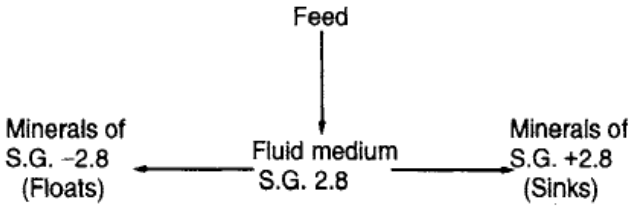
۱۵

۱۶

روشهای واسطه سنگین

اصول جدایش

چنانچه جرم مخصوص یک محیط سیال در حد واسط جرم مخصوص دو کانی مورد نظر باشد، کانی سنگینتر از واسطه غرق و کانی سبکتر از واسطه شناور می شود.
در جداکننده هایی که در آنها مواد تحت تاثیر نیروی ثقل جدا می شوند، دو نیروی اساسی در جدایش مواد موثرند: 1- نیروی ثقل 2- نیروی مقاومت سیال. این دو نیرو مخالف هم عمل می کنند .
ذراتی که جرم مخصوص آنها معادل جرم مخصوص واسطه باشد، در همان حوالی به صورت غوطه ور باقی می مانند.



Principle of dense medium separation

۱۷

مایعات سنگین

- با استفاده از مایعی که چگالی آن در حد فاصل چگالی های دو کانی متشکله یک سنگ معدنی باشد، امکان جدایش آنها به طور دقیق و با راندمان بسیار خوب وجود دارد.

- حلال این مایعات نفت سفید یا حلال های دیگر با چگالی کمتر است. لذا با رقیق کردن هر یک از مایعات با حلال آن می توان مایعی با چگالی در حد فاصل مایع سنگین و حلال تهیه کرد.

۱۸

مایعات سنگین

Heavy liquids used for sink-float separations. Group 2A is a probable carcinogen; Group 2B is a possible carcinogen; Group 3 is an unclassifiable carcinogen. [14,15]

Heavy liquid	Formula	S.G.	Dilution	Health
Tri-chloro-ethylene	CCl_2CHCl	1.46	-	group 2A carcinogen
Carbon-tetrachloride	CCl_4	1.5	Most organic liquids	group 2B carcinogen
Bromoform, Tribromomethane	$CHBr_3$	2.87	Alcohol, CCl_4	liver damage, group 3
Tetrabromoethane (TBE)	$C_2H_2Br_4$	2.95	Alcohol, CCl_4 Chloroform	suspected carcinogen
Di-iodo methane (Methylene iodide)	CH_2I_2	3.31	CCl_4, Benzene	moderate toxicity-central nervous system
Clerici solution (thallium malonate/thallium formate)	$(TlCOOH)_2C$/ $TlCOOH$	4.2-5.0	Water	highly toxic, cumulative poison.
lithium heteropolytungstate (LST)	$Li_mX_n(W_{12}O_{40})$	2.95	Water	Low to moderate toxicity
sodium polytungstate (SPT)	$Na_6(H_2W_{12}O_{40})$	3.1	Water	Low to moderate toxicity
lithium metatungstate (LMT)	$Li_6(H_2W_{12}O_{40})$	3.0	Water	Low to moderate toxicity

سوسپانسیون

برای تولید یک مخلوط پایدار با دانسیته بالا و ویسکوزیته نسبتاً پایین لازم است از ذرات ریز با وزن مخصوص زیاد استفاده کرد.
مخلوط کردن برای پراکنده کردن ذرات و پایین آوردن ویسکوزیته ظاهری ضروری است.

ایجاد جریانهای 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.

مواد رایج در تهیه واسطه های سنگین

گالن (Galena): به علت داشتن وزن مخصوص زیاد برای تهیه واسطه هایی با دانسیته بالای 4 مورد استفاده قرار می گیرد. اما با توجه به تردی نسبی، قابلیت اکسیداسیون سریع سطح آن و در نتیجه مشکل بازیابی آن (به روش فلوتاسیون) به تدریج اهمیت خود را از دست داده است.

۲۰

مشخصات مورد نیاز برای مواد واسطه:

- سختی: نباید به راحتی خرد شود.
- پایداری شیمیایی: نباید از لحاظ شیمیایی خورنده باشد و یا با کانیها و محیط واکنش شیمیایی دهد.
- ته نشینی آرام در ویسکوزیته معقول: پالپ پایداری تشکیل دهد و زیاد خرد نشود.
- وزن مخصوص: باید وزن مخصوص زیادی داشته باشد تا بتواند در دانسیته پالپ نسبتاً کم وزن مخصوص پالپ را به میزان لزوم افزایش دهد.
- بازیابی: واسطه باید به آسانی بازیابی گردد.
- قیمت و قابلیت دسترسی: باید به راحتی قابل دستیابی باشد و ارزان باشد.

۲۱

مگنتیت (Magnetite): با وزن مخصوص 5/1 که نسبتاً ارزان است برای تهیه دانسیته های بالای 2/5 مورد استفاده قرار می گیرد.

فروسیلیسیم (Ferrosilicon): آلیاژی از آهن و سیلیس با دانسیته 6/9 – 6/7 است که میزان سیلیس آن در حدود 15% است. کاهش سیلیس از این حد قابلیت زنگ زدگی آنرا افزایش می دهد و افزایش سیلیس قابلیت بازیابی آن به روش مغناطیسی را کاهش می دهد. دانسیته مخلوطی که با فروسیلیکون تهیه می شود، می تواند 3/4 باشد.

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

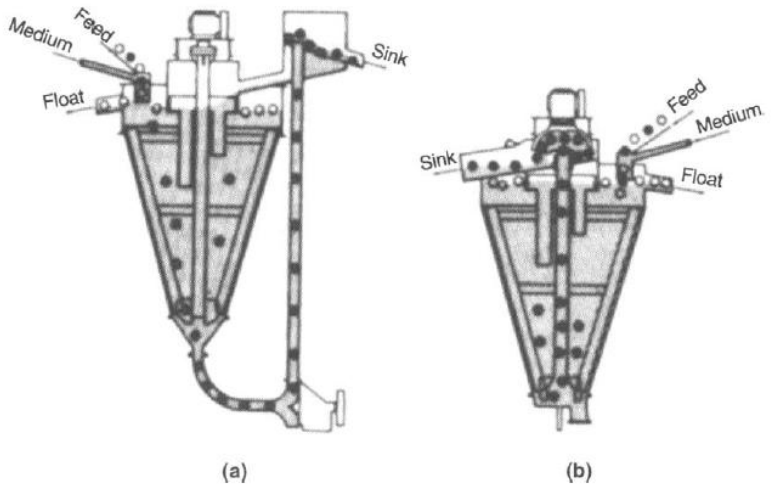
جدا کننده های واسطه سنگین

جدا کننده های ثقلی : بار اولیه به داخل آنها 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 پاروهایی آنها را تخلیه می کنند. کانی های سنگین نیز غوطه ور می شوند.

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 سنگین آرایش داد.

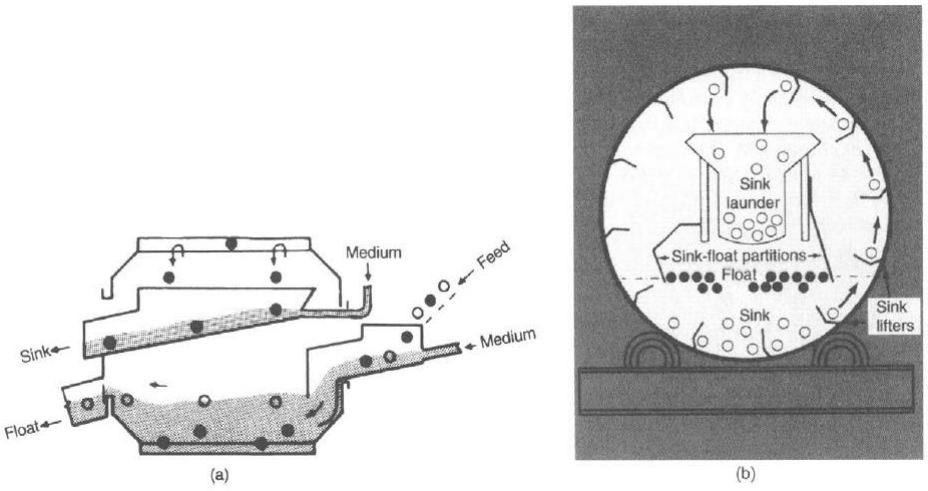
توسط جدا کننده های ثقلی موادی در **ابعاد** بزرگتر از 13 میلیمتر را می توان آرایش داد، حال آنکه توسط جدا کننده های گریز از مرکز موادی در ابعاد بزرگتر از 1 یا 0/5 میلیمتر قابل آرایش هستند.

۲۳



Wemco cone separator. (a) Single-gravity, two-product system with torque-flow-pump sink removal; (b) Single-gravity, two-product system with compressed-air sink removal

۲۴



Drum separator: (a) side view, (b) end view

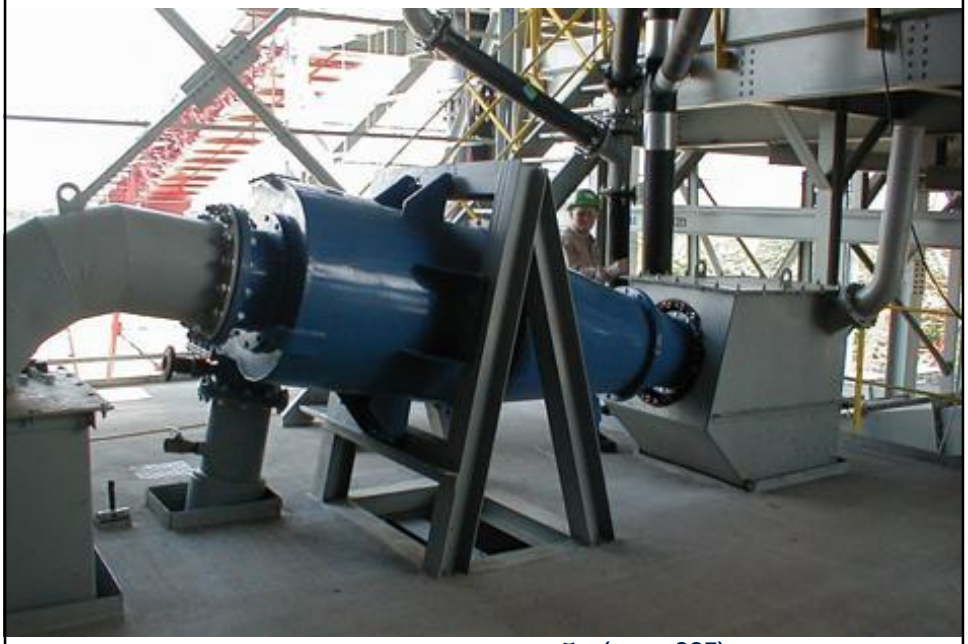
جدایش قطعات تا ابعاد 300 میلیمتر و ظرفیت 450 تن بر ساعت.

۲۵

سیکلون واسطه سنگین

واسطه منیتیتی و یا فرو سیلیسیوم به طور مماسی و از ارتفاع 3 متری به داخل هیدروسیکلون وارد می شود. بخش غرق شده از ته ریز و بخش شناور شده از سرریز خارج می شود.

۲۶

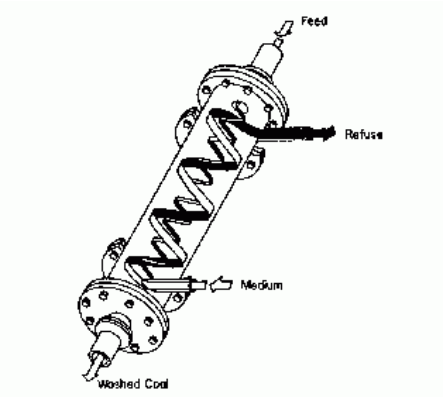


واسطه: مگنتیت (325- مش) و آب.

۲۷

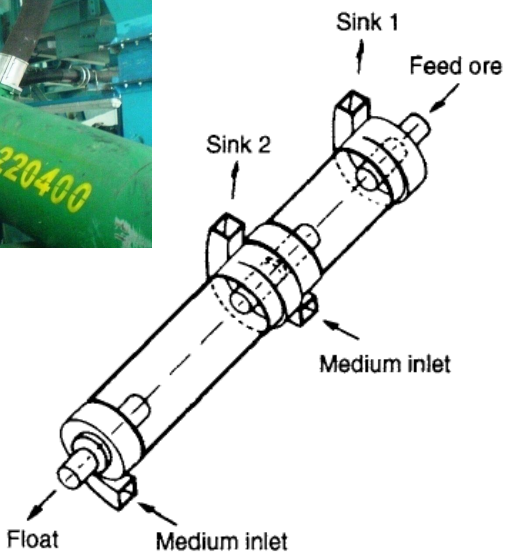
جداکننده Dyna whirlpool

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 خارج می شوند.



۲۸

جداکننده Tri-Flo



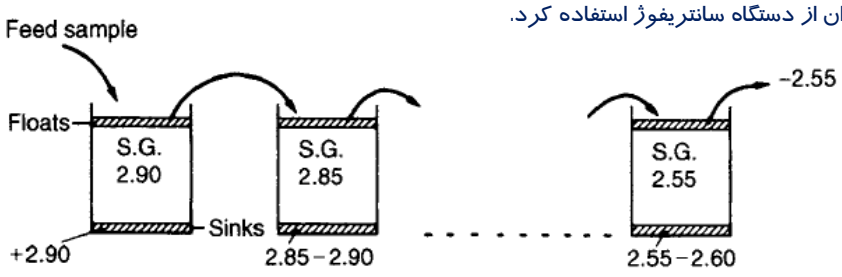
۲۹

بررسیهای آزمایشگاهی توسط مایعات سنگین و کاربردهای آن

از مایعات سنگین در آزمایشگاه به منظور بررسی قابلیت پرعیار کردن یک سنگ معدنی به روشهای ثقلی و تعیین چگالی واسطه سنگین در عملیات صنعتی استفاده می شود.

در ظروف جداگانه، مایعاتی با دانسیته های مختلف ریخته می شود. در ابتدا نمونه خرد شده به داخل ظرف با بالاترین دانسیته ریخته می شود. محصول شناور شده جدا شده و پس از شستشو در ظرف بعدی با دانسیته پایین تر وارد می شود و عملیات به همین ترتیب تا ظرف آخری ادامه داده می شود. سپس محصولات ته نشین شده و محصول شناور شده نهایی پس از آبکش و خشک کردن توزین می شوند.

در این آزمون باید زمان کافی برای ته نشین شدن ذرات ریز داده شود. برای تسریع این کار می توان از دستگاه سانتریفوژ استفاده کرد.



Heavy liquid testing

آزمایشهای غرق و شناورسازی برای یک کانه قلع

Heavy liquid test results

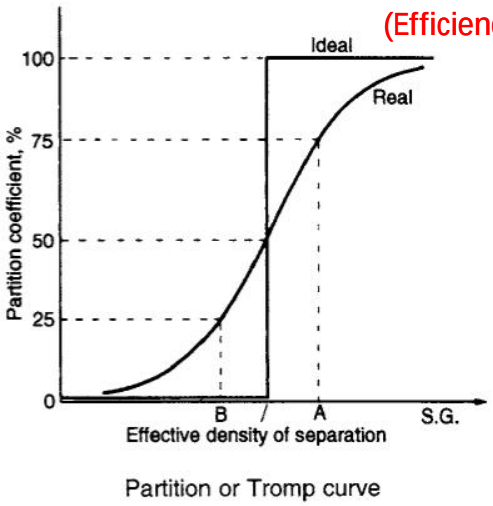
(1) Specific gravity fraction	(2) % Weight	(3) Cumulative % Weight	(4) Assay (% Sn)	(5) Distribution (% Sn)	(6) Cumulative distribution (% Sn)
−2.55	1.57	1.57	0.003	0.004	0.004
2.55–2.60	9.22	10.79	0.04	0.33	0.37
2.60–2.65	26.11	36.90	0.04	0.93	1.30
2.65–2.70	19.67	56.57	0.04	0.70	2.00
2.70–2.75	11.91	68.48	0.17	1.81	3.81
2.75–2.80	10.92	79.40	0.34	3.32	7.13
2.80–2.85	7.87	87.27	0.37	2.60	9.73
2.85–2.90	2.55	89.82	1.30	2.96	12.69
+2.90	10.18	100.00	9.60	87.34	100.00

از ستونهای 3 و 6 مشاهده می شود که اگر دانسیته جدایش 2/75 انتخاب شود 68/48% مواد از 2/75 سبکترند و با انتقال به بخش شناور شده از سنگ معدن جدا می شوند و تنها 3/81% از قلع از دست می رود. یا 96/19% از قلع به بخش غرق شده بازیابی می شود که 31/52% از وزن خوراک اولیه را دارد.

در انتخاب دانسیته جدایش بهینه، بایستی ملاحظات اقتصادی را در نظر گرفت.

۳۱

کارآیی جدایش مایعات سنگین
(Efficiency of Dense Medium Separation)



Partition or Tromp curve

در آزمایشات مایعات سنگین، مشکل مربوط به ذراتی است که دانسیته آنها نزدیک دانسیته مایع است و ممکن است در اثر نبودن زمان کافی، به محصول شناور راه پیدا نکند و در نتیجه به اشتباه تقسیم شوند.

کارآیی جدایش در این نوع جدایش توسط شیب منحنی جدایش تعیین می شود.

خطای احتمالی جدایش:

$$Ep = (A - B)/2$$

هر چه Ep کمتر باشد کارآیی جدایش بالاتر بوده و خط بین A و B به عمود نزدیکتر است.

۳۲

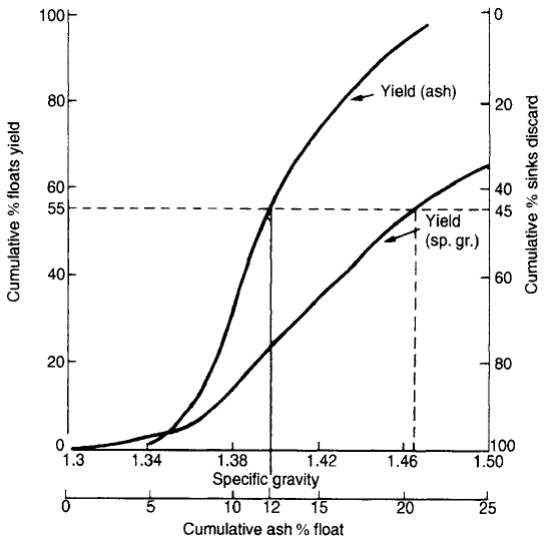
بررسی قابلیت شستشوی ذغالسنگ

(1) Sp. gr. fraction	(2) Wt %	(3) Ash %	(4) Ash product	(5) Separating density	(6)	(7) Cumulative float (Clean coal)	(8)	(9) Cumulative sink (Discard)	(10)	(11)
					Wt %	Ash product	Ash %	Wt %	Ash product	Ash %
−1.30	0.77	4.4	3.39	1.30	0.77	3.39	4.4	99.23	2213.76	22.3
1.30–1.32	0.73	5.6	4.09	1.32	1.50	7.48	5.0	98.50	2209.67	22.4
1.32–1.34	1.26	6.5	8.19	1.34	2.76	15.67	5.7	97.24	2201.48	22.6
1.34–1.36	4.01	7.2	28.87	1.36	6.77	44.54	6.6	93.23	2172.61	23.3
1.36–1.38	8.92	9.2	82.06	1.38	15.69	126.60	8.1	84.31	2090.55	24.8
1.38–1.40	10.33	11.0	113.63	1.40	26.02	240.23	9.2	73.98	1976.92	26.7
1.40–1.42	9.28	12.1	112.29	1.42	35.30	352.52	10.0	64.70	1864.63	28.8
1.42–1.44	9.00	14.1	126.90	1.44	44.30	479.42	10.8	55.70	1737.73	31.2
1.44–1.46	8.58	16.0	137.28	1.46	52.88	616.70	11.7	47.12	1600.45	34.0
1.46–1.48	7.79	17.9	139.44	1.48	60.67	756.14	12.5	39.33	1461.01	37.1
1.48–1.50	6.42	21.5	138.03	1.50	67.09	894.17	13.3	32.91	1322.98	40.2
+1.50	32.91	40.2	1322.98	–	100.00	2217.15	22.2	0.00	0.00	0.0
Total	100.0	22.2	2217.15							

تجمعي ستون ۲ = ستون ۶ ۴/۲ = ستون ۸

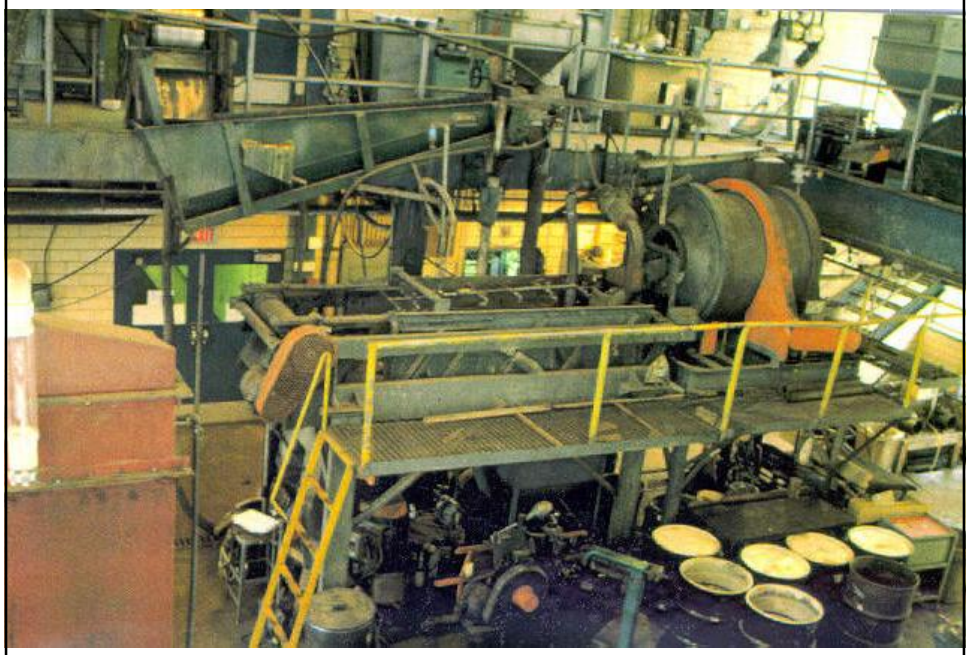
۳۳ ۲×۳= ستون ۴ تجمعي ستون ۴ =ستون ۷

منحنی شستشوپذیری زغال



۳۴

Child in Lao PDR panning gold with a wooden batea



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

کانه آرایی

جلسه های چهاردهم

فلوتاسیون

مدرس:
علی احمدی

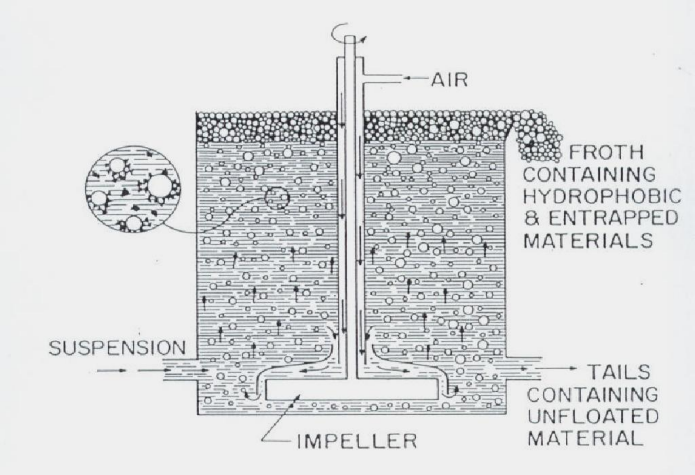
۱

مقدمه

- فلوتاسیون یا شناورسازی مهمترین و همه جانبه ترین روش کانه آرایی است.
- مواد با ارزش (فلوتاسیون مستقیم) و یا بی ارزش (فلوتاسیون معکوس) به دلیل خواص فیزیک/ شیمیایی خاص سطحی به حبابهای هوا می چسبند و به صورت کفی باردار از سیستم خارج میشوند.
- برای چسبیدن کانی به حباب هوا، شرط اول آبران یا هیدروفوبیک (Hydrophobic) بودن ذرات است.
- برای اینکه ذرات آبران چسبیده به حبابهای هوا به کف (کنسانتره) حمل شوند، بایستی حبابها پایدار باشند و در بین راه در اثر ترکیدن بار خود را رها نکنند.
- برای آبران کردن ذرات از مواد شیمیایی به نام کلکتور (Collector) و برای پایدار کردن حبابها از کف ساز (Frother) استفاده می کنند.
- اغلب کانیها آبران نیستند و مواد شیمیایی بایستی به پالپ اضافه شود تا آنها آبران شوند . کانیهایی که استثناء هستند و بطور طبیعی آبران می باشند عبارتند از: گرافیت، مولیبدنیت، الماس، زغالسنگ، تالک و غیره

۲

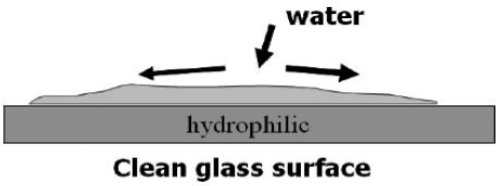
Froth Flotation Cell



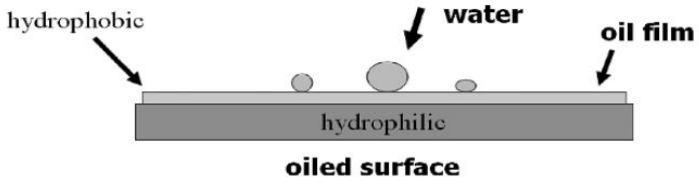
کاربردهای فلوتاسیون

- فرآوری مواد معدنی خام مانند سولفیدها، اکسیدها و ...
- فرآوری زغالسنگ
- فرآوری باطله های معدنی
- جداسازی پسابهای صنعتی
- رنگزدایی کاغذهای مستعمل
- جداسازی روغن از محیطهای آبی
- و غیره

۴

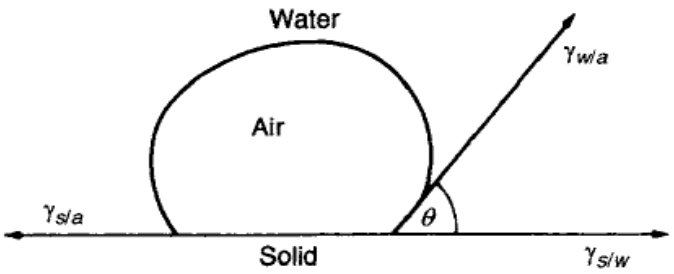


Spreading of water over a hydrophilic clean glass surface.



Beading of water on an oiled hydrophilic surface.

نیروهای عمل کننده در محیط سه فازی هوا- آب- جامد



Contact angle between bubble and particle in an aqueous medium

$$\gamma_{s/a} = \gamma_{s/w} + \gamma_{w/a} \cos \theta$$

$\gamma_{s/a}$: انرژی سطحی بین جامد-گاز

$\gamma_{s/w}$: انرژی سطحی بین جامد - مایع

$\gamma_{w/a}$: انرژی سطحی بین کایع – گاز

θ: زاویه تماس سطح جامد و هوا

نیروی لازم برای شکستن واحد سطح مشترک هوا – ذره (کار چسبیدن):

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a} + \gamma_{s/w} - \gamma_{s/a}$$

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a}(1 - \cos\theta)$$

- بنابراین هرچه زاویه تماس بیشتر باشد کار لازم برای جدایی ذره از حباب بیشتر می شود.
- نتیجه: قابلیت شناورسازی یک کانی با زیاد شدن زاویه تماس افزایش پیدا می کند.
- کانیهای با زاویه تماس بالا، هوادوست (Aerophilic) نامیده می شوند.

۷

مراحل مختلف فلوتاسیون مطلوب

برخورد (Collision): اولین مرحله، برخورد ذره به حباب است.

هرچه ذرات کوچکتر باشند احتمال برخورد کمتر است . (معمولاً ابعاد ذرات ۵۰ میکرون و ابعاد حباب حدود ۱ میلیمتر است.

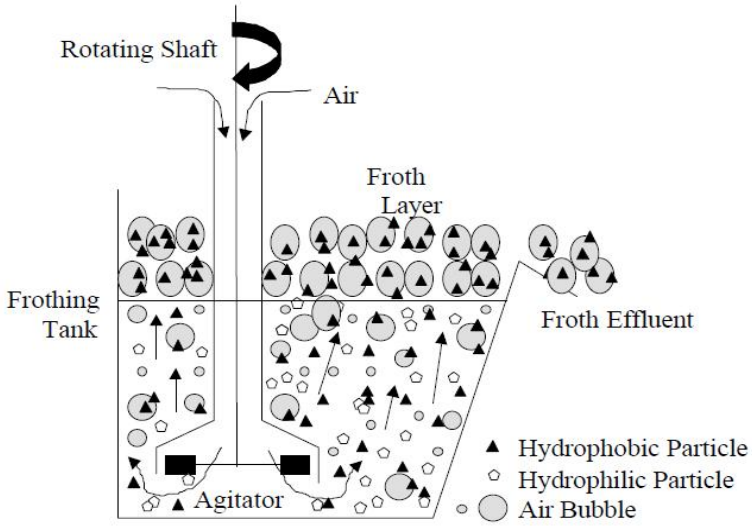
اتصال (Attachment): وقتی که ذره به حباب برخورد می کند و به آن می چسبد روی سطح آن حرکت می کند.

زمان لازم برای کنار زدن لایه آب باید کمتر از زمان سر خوردن ذره باشد.

سر خوردن ذرات روی سطح حباب

پایداری (Stability): برای انتقال ذرات متصل شده به کف (کنسانتره) پایداری حبابهای مورد نیاز ضروری است.

۸



Sub-Aerated Mechanical Froth Flotation Apparatus.

۹

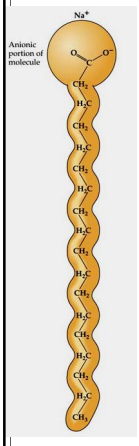
واکنشگرهاي شيميايي

- کلکتورها(Collector)
- کف سازها (Frother)
- فعال کننده ها(Activator)
- بازدارنده ها(Depressant)
- متفرق کننده ها(Dispersant)
- فلوکولانت ها(Floculant)

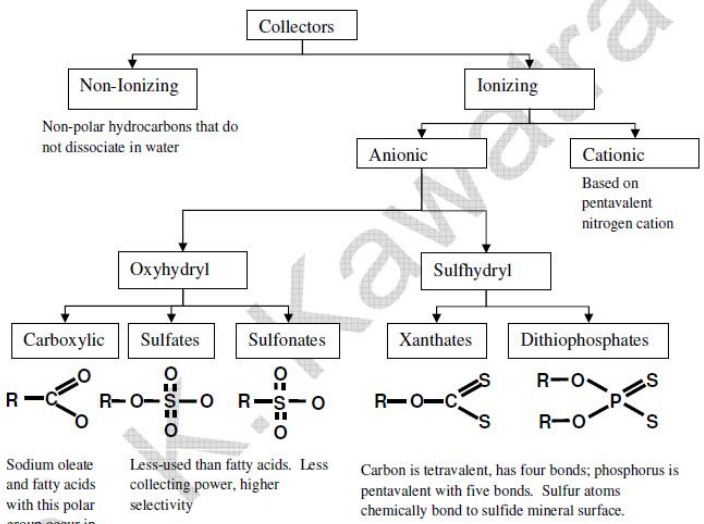
کلکتورها (Collectors)

- قابلیت آبرانی کانیها را میتوان توسط مواد آلی افزایش داد و آنها را شناور کرد؛ این مواد آلی را کلکتور می نامند.
- کلکتورها از یک رأس قطبی و یک رأس غیرقطبی (زنجیر هیدروکربن) تشکیل شده اند. رأس قطبی در سطح کانی جذب شده و گروه غیرقطبی به سمت فاز مایع جهت گیری می کند و چون با آب واکنش نمی دهد باعث آبران شدن سطح کانی میشود.
- گروه قطبی از کاتیونها و آنیونها تشکیل شده است که یک یون، فعال و دیگری یون غیرفعال می باشد. گروه غیرقطبی به یون فعال متصل است و یون فعال به عنوان پل ارتباطی بین زنجیر هیدروکربن و سطح کانی عمل می کند؛
- بنابراین، قدرت انتخابی بودن کلکتور وابسته به یون فعال و خاصیت آبرانی آن متناسب با طول زنجیر هیدروکربن است.

۱۱



Sodium oleate and fatty acids with this polar group occur in vegetable oils. Collector for hematite and other metal oxide minerals. Strong collector, low selectivity

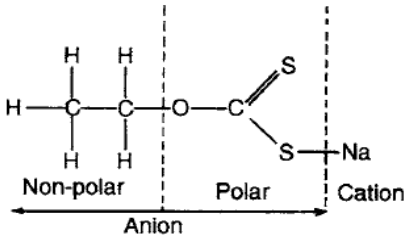


Less-used than fatty acids. Less collecting power, higher selectivity

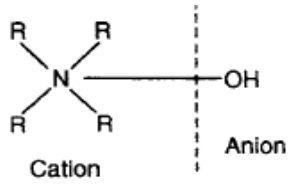
Carbon is tetravalent, has four bonds; phosphorus is pentavalent with five bonds. Sulfur atoms chemically bond to sulfide mineral surface.

۱۲

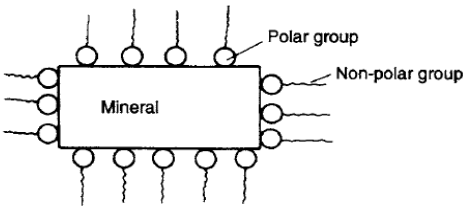
Dr. Kawara



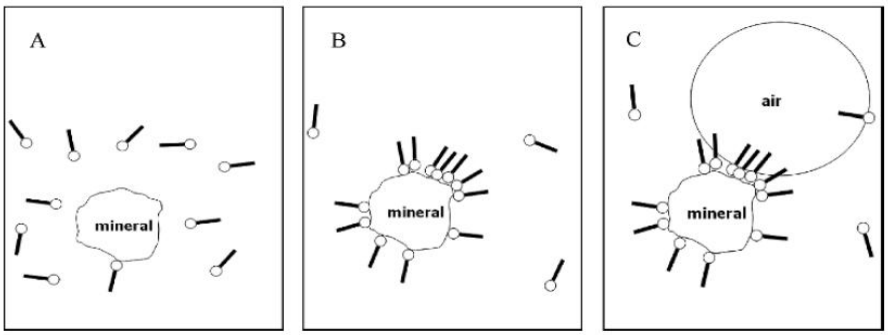
Structure of sodium ethyl xanthate



Cationic amine collector



Collector adsorption on mineral surface

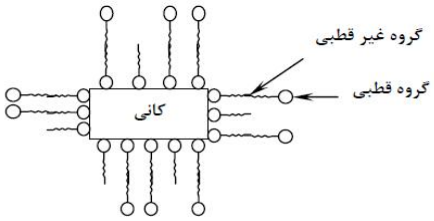


A: Collector dissolved in the aqueous phase, B: Adsorption onto a mineral surface and C: attachment of an air bubble onto the hydrophobic surface.

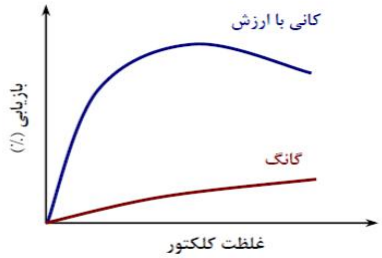
به دلیل جذب شیمیایی یا فیزیکی بین قسمت قطبی و سطوح ذرات، مولکولهای کلکتور جذب می شوند.

با افزایش غلظت کلکتور، بازیابی ذرات افزایش می یابد ولی بعد از نقطه ای که به آن غلظت بحرانی میسلی (critical micelle concentration (CMC)) گفته می شود.

علت وجود نقطه بحرانی، تشکیل چند لایه کلکتور است که تعداد زنجیره های هیدروکربنی به طرف محلول را کم می کند.



تشکیل چند لایه‌ای کلکتور

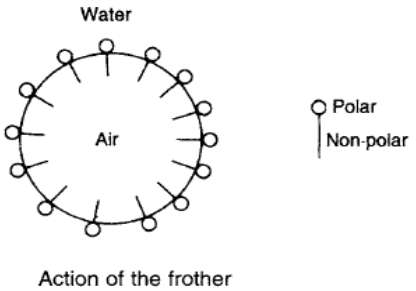


رابطه بازیابی با غلظت کلکتور

کف سازها (Frothers)

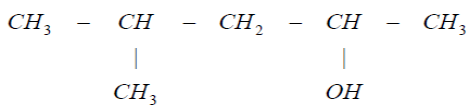
کف سازها از نوع مواد آلی هستند که دارای ساختمان غیر متقارن می باشند و قادرند در سطح بین هوا - آب جذب سطحی شوند. گروه قطبی کف ساز با آب ترکیب می شود و گروه هیدروکربن به طرف داخل کشیده می شود.

الکلها (-OH) متداولترین نوع کفسازها هستند.



Action of the frother

MIBC (متیل ایزو بوتیل کربونیل) با ساختار مولکولی زیر، یک نوع کف ساز می باشد.



تنظیم کننده ها (Modifiers)

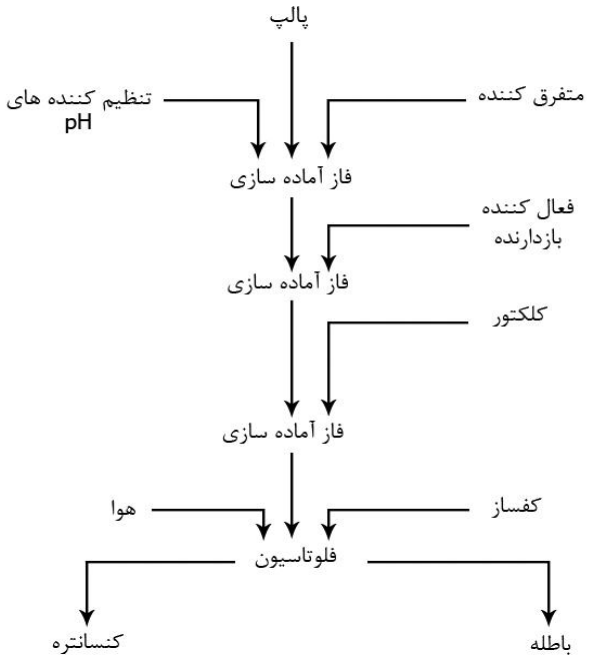
بازداشت کننده ها (Depressants): مواد شیمیایی هستند که اضافه کردن آنها به محیط فلوتاسیون باعث آبگیر شدن کانیهای دیگر و لذا مانع فلوتاسیون آنها میگردد و در عین حال تأثیر نامناسبی بر روی کانی مورد نظر (مورد شناور شدن) باقی نمی گذارند.

فعال کننده ها (Activators): موادی هستند که خاصیت شناور شدن بعضی از مواد معدنی را تقویت می کنند.

مثال: فعال کردن اسفالریت توسط سولفات مس و بازداشت آن توسط سیانورها.

تنظیم کننده pH: موادی هستند که pH پالپ را برای کارآیی بهینه مواد شیمیایی یا ذرات کانی تنظیم می کنند. مانند آهک و اسید سولفوریک

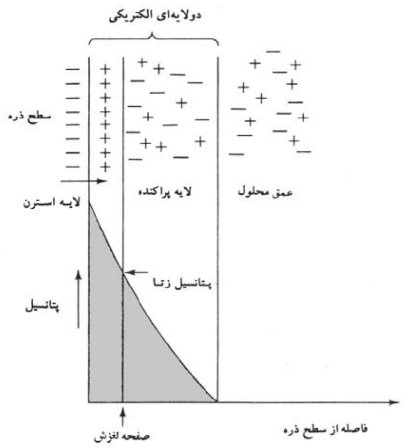
۱۷



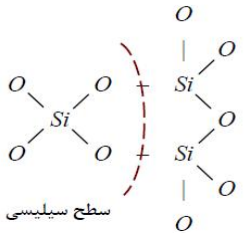
۱۸

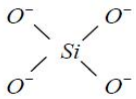
دو لایه الکتریکی (Electrical Double Layer)

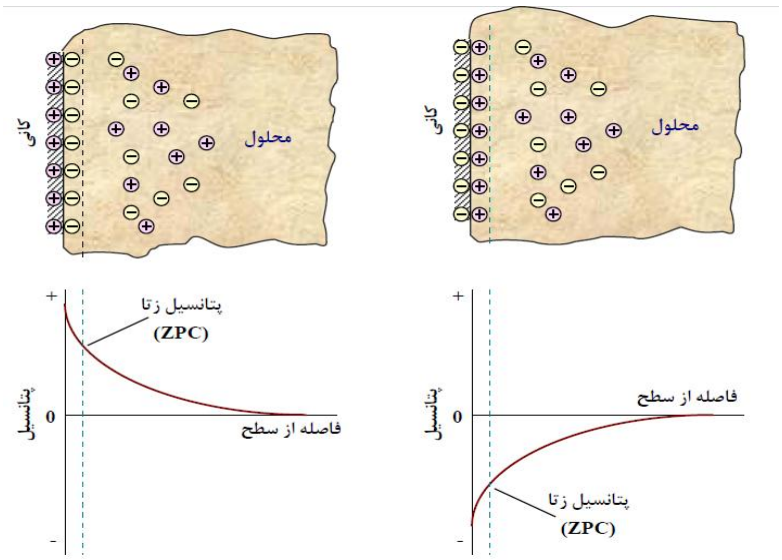
وقتی یک کانی در یک محلول قطبی قرا بگیرد سطح آن تحت مکانیزمهای جذب شیمیایی، جانشینی شبکه ای و یا حلالیت ترجیحی بار دار می شود و در سطح ذره دو لایه الکتریکی به وجود می آید که یک لایه آن متصل به ذره و لایه دیگر آن در محلول قرار می گیرد.



$$SiO_2 + 2H_2O \rightarrow \begin{matrix} O^- \\ | \\ O^- - Si - O^- \\ | \\ O^- \end{matrix} + 4H^+$$







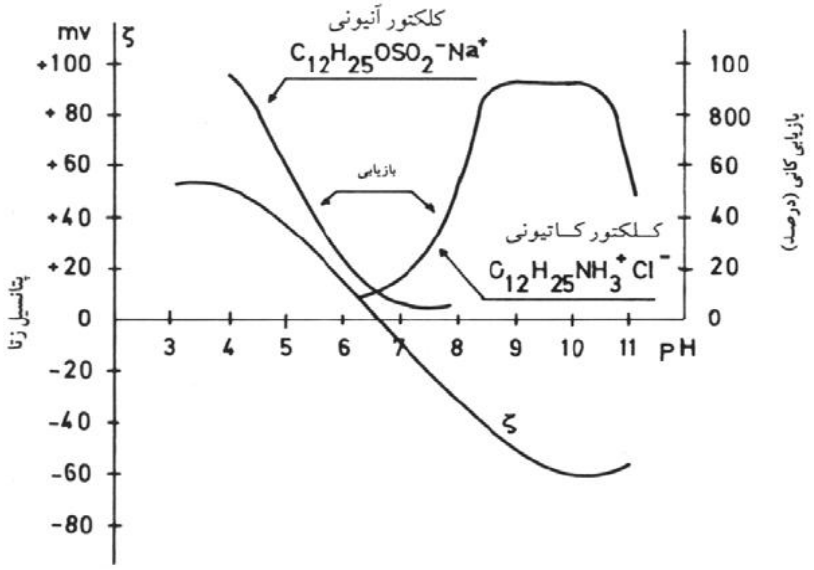
پتانسیل الکتریکی که در صفحه برش وجود دارد به **پتانسیل زتا** معروف است.

در مورد کانیهای اکسیدی و سیلیکاته و نیز نمکهای کم محلول، طی فعل و انفعالات شیمیایی ذره و آب، در محیط یونهای H^+ و OH^- بوجود می آید و در نتیجه سطح ذرات با افزایش و یا کمبود بارهای مثبت و منفی مواجه میشود که طی آن در سطح ذرات بار مشخصی به وجود می آید.

در یک pH مشخص بار سطحی ذرات به صفر می رسد که به آن **نقطه بار صفر** (Zero Point of Charge : ZPC) می گویند.

نقطه بار صفر کانیها در استفاده از نوع کلکتورها و شناورسازی کانیها اهمیت فراوان دارد.

۳۱



تغییرات پتانسیل زتا نسبت به pH

۳۲

Isoelectric Point of Various Minerals

Minerals	PZC or IEP
Quartz, SiO_2	pH 2 - 3.7
Rutile, TiO_2	pH 6.0
Corundum, Al_2O_3	pH 9.0
Magnesia, MgO	pH 12.0
Fluorapatite (natural), $Ca_2(PO_4)_3$ (F, OH)	pH 6
Fluorapatite (synthetic)	pCa 4.4, pF 4.6, $pHPO_4$ 5.22
Hydroxyapatite, $Ca_5(PO_4)_3(OH)$, Synthetic	pH 7 - 7.15, $pHPO_4$ 4.19 - 4.48
Calcite $CaCO_3$	pH 9.5
Barite $BaSO_4$	pBa 6.7
Silver iodide, AgI	pAg 5.6
Silver Sulfide Ag_2S	pAg 10.2

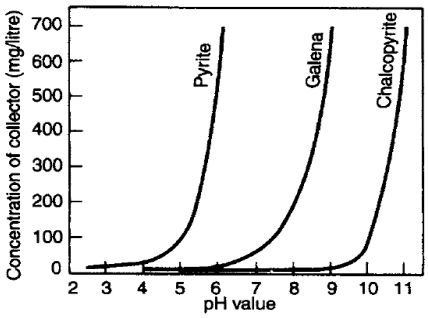
۲۳

اهمیت pH در شناورسازی کانیها

معمولاً فلوتاسیون در محیط قلیایی انجام می شود. در این محیط گزنتات پایدار بوده و خوردگی در لوله ها ایجاد نمی شود.

برای تنظیم **pH** از آهک و اسید سولفوریک استفاده می شود.

برای هر کانی بسته به غلظت کلکتور، **pH** بحرانی وجود دارد که بالاتر از آن کانی شناور نمی شود . مثلاً در **pH** بیش از ۹، گالن شناور نمی شود ولی کالکوپیریت شناور می شود



Relationship between concentration of sodium diethyl dithiophosphate and critical pH value (after Sutherland and Wark, 1955)

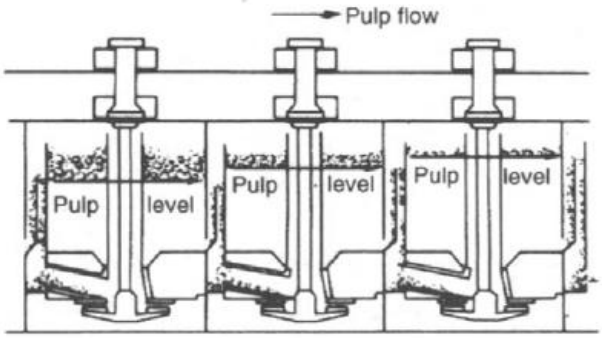
علت این امر رقابت یونهای هیدروکسیل با گزنتات می باشد. هرچه **pH** بیشتر باشد حالت بازدارندگی به علت افزایش یون OH^- بیشتر می باشد.

مدارهای فلوتاسیون

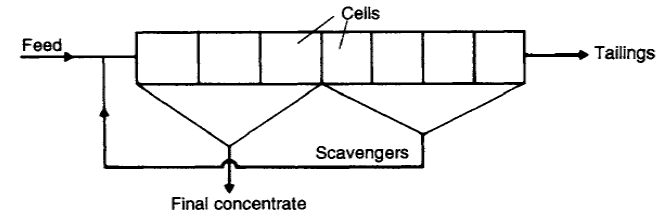
پالپ از اولین سلول ردیف وارد شده و بعد از منتقل کردن بعضی از کانیهای با ارزش به کف، به سلول بعدی سرریز می شود.

با نزدیک شدن به سلولهای آخر مقدار کانی قابل شناورسازی کم می شود و معمولاً عمق کف نسبت به سلولهای اولیه خیلی کمتر می شود.

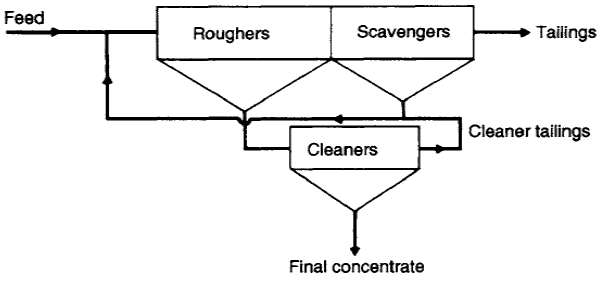
در سلولهای آخر سعی می شود که مواد با شناورسازی ضعیف تر شناور شوند که به این سلولها، رمق گیر (Scavenger) گفته می شود.



۲۵

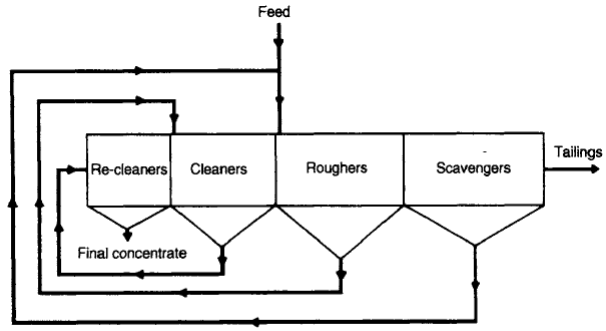


Simple flotation circuit



Rougher–scavenger–cleaner system

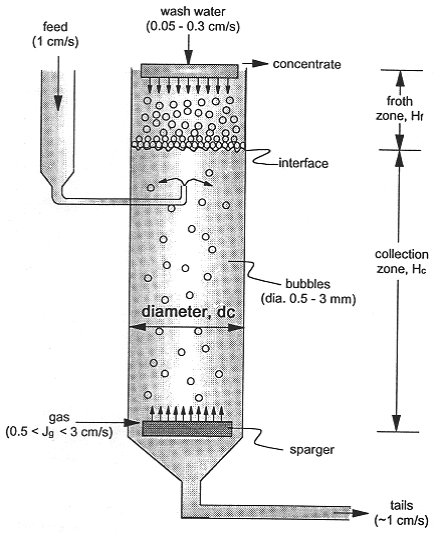
۲۶

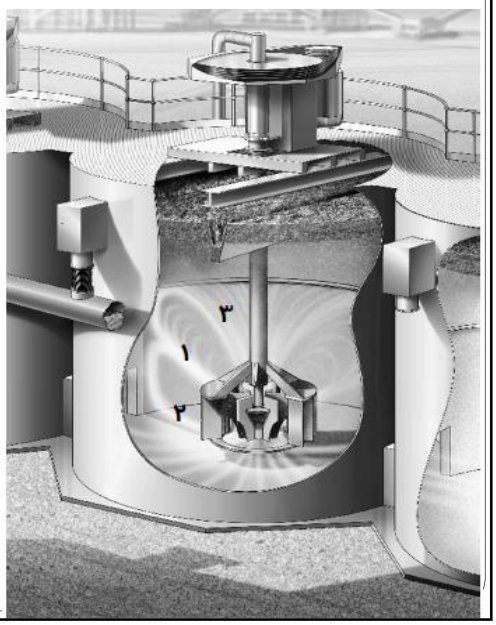


Circuit employing recleaning

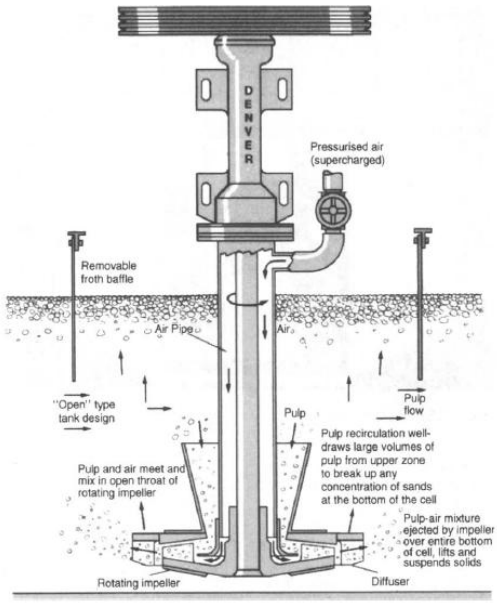
۲۷

ماشین های فلوتاسیون





۲۸



٢٩

Denver D–R flotation machine

٢١ Mechanical flotation cells

٢٢

The Floatability Characterisation Test Rig (FCTR) (Courtesy JKMRC and JKTech Pty L

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

فرآوری مواد معدنی

جلسه های پانزدهم

جدایش مغناطیسی و الکترواستاتیکی

مدرس:
علی احمدی

1

در جدایش مغناطیسی از خواص مغناطیسی برای جداسازی کانیهای با ارزش از گانگ غیر مغناطیسی استفاده می شود.

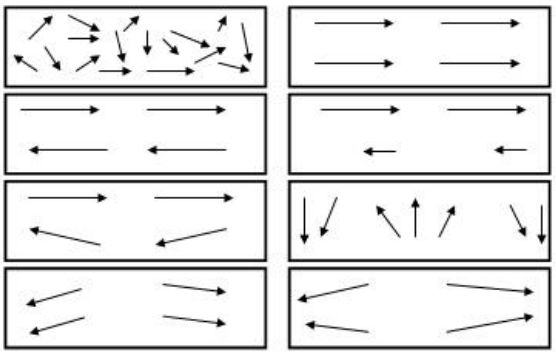
مواد بر اساس اینکه به یک آهنربا جذب یا از آن دفع شوند به دو گروه بزرگ تقسیم می شوند:

دیا مگنتیک (Diamagnetic): موادی هستند که در طول خطوط نیروی مغناطیسی به سمت شدت میدان کمتر دفع می شوند. مانند کوارتز
پارامگنتیک (Paramagnetic): موادی هستند که در طول خطوط نیروی مغناطیسی به سمت شدت میدان بیشتر جذب می شوند. مانند ایلمنیت، پیریت و کرومیت

یک حالت خاص از مواد پارامگنتیک، **فرومگنتیک** (Ferromagnetic) نام دارد که در آن مواد دارای خاصیت مغناطیسی شدن بالایی هستند و در صورت خارج شدن از میدان، مقداری از خاصیت مغناطیسی به صورت القاء در آن باقی می ماند. مانند مگنتیت

۲

- **خواص مغناطیسی کلیه مواد معدنی به طورمستقیم به بار الکتریکی و گشتاور مغناطیسی الکترونها که به اسپین معروف است، بستگی دارد.**
- **حرکت اوربیتالی الکترون ها در اتم، گشتاور دوقطبی مغناطیسی ایجاد می کند. مجموع این گشتاورها به همراه مجموع گشتاورهای حاصل از اسپین الکترون ها در یک میدان مغناطیسی اعمال شده، تعیین کننده گشتاور مغناطیسی در واحد حجم است.**
- **نحوه قرارگیری اسپین ها در مواد معدنی مشخص کننده خصوصیات مغناطیسی آنها خواهد بود.**



۳

اصول فیزیکی جدایش مغناطیسی

تعداد خطوط نیروی عبوری از واحد سطح مواد یا دانسیته شار مغناطیسی (Magnetic Flux Density; B) یا القاء مغناطیسی (Magnetic Induction) با واحد **تسلا** (Tesla; T) اندازه‌گیری می‌شود.

$$B = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

$$Q = \mu_0 q_m$$

B: دانسیته شار مغناطیسی (T)

μ_0: قدرت نفوذپذیری مغناطیسی خلاء $(T.m/A)$

q_m: قدرت مغناطیسی قطب $(A.m)$

نیروی مغناطیس کننده که خطوط نیرو را در یک ماده القاء می‌کند، شدت میدان (Field Intensity) نـام دارد و واحد آن A/m می‌باشد ($1A/m=4\pi\times10^{-7}T$).

شدت مغناطیس شدن (M) یک ماده عبارت است از ممان مغناطیسی بر واحد حجم (V):

$$M_{(A/m)} = \frac{q_m \times l}{V}$$

l: فاصله بین قطبها (m)

q_m: قدرت مغناطیسی قطب $(A.m)$

رابطه دانسیته شار مغناطیسی (B) و شدت میدان (H):

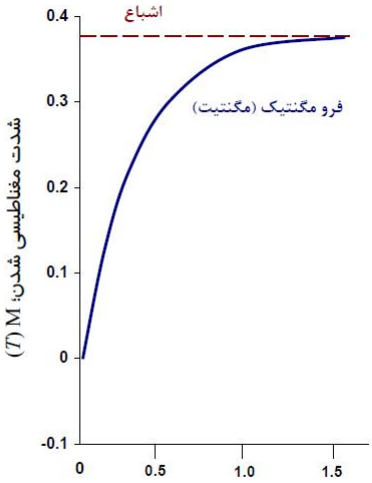
$$B = \mu_0(H + M)$$

تأثیر پذیری مغناطیسی (Magnetic Susceptibility)، (S) عبارت است از خارج قسمت شدت مغناطیسی شدن یک ماده بر میدان مغناطیسی تولید کننده.

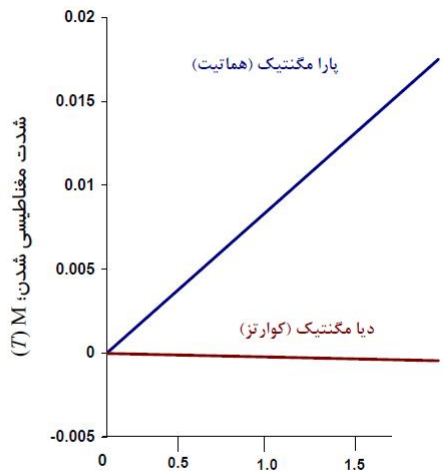
$$S = \frac{M}{H}$$

۵

رابطه شدت مغناطیسی شدن مواد با خواص مغناطیسی مختلف



میدان مغناطیسی اعمال شده، H (T)

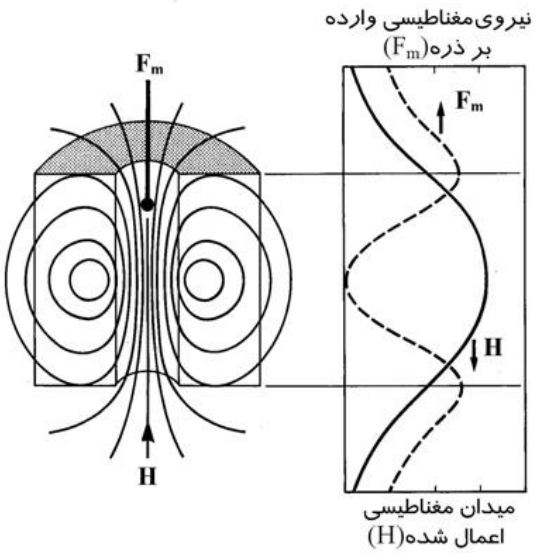


میدان مغناطیسی اعمال شده، H (T)

Mineral	Magnetic susceptibility (X_m x 10^6 emu/g)	
Magnetite	20 000 - 80 000	Ferromagnetic (strong magnetic)
Pyrrhotite	1 500 - 6 100	
Hematite	172 - 290	Paramagnetic (weakly magnetic)
Ilmenite	113 - 271	
Siderite	56 - 64	
Chromite	53 - 125	
Biotite	23 - 80	
Goethite	21 - 25	
Monazite	18.9	
Malachite	8.5 - 15.0	
Bornite	8.0 - 14.0	
Rutile	2.0	
Pyrite	0.21	
Cassiterite	- 0.08	Diamagnetic (repelling)
Fluorite	- 0.285	
Galena	- 0.35	
Calcite	- 0.377	
Quartz	- 0.46	
Gypsum	- 1.0	
Sphalerite	- 1.2	
Apatite	- 2.64	

۷

نیروی وارده بر یک ذره در یک میدان مغناطیسی



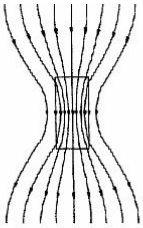
$$F \propto H \frac{dH}{dl}$$

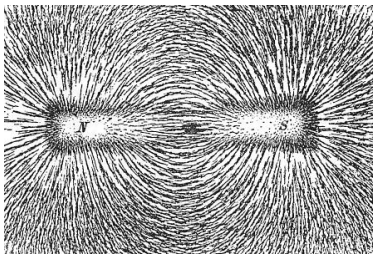
برای تولید یک نیروی مغناطیسی مؤثر برای جدا کردن ذرات بایستی شدت میدان مغناطیسی و گرادیان هر دو بالا باشند.

نیروهای وارد بر ذرات

نیروهای مغناطیسی،گرانشی و مقاومت هیدرو دینامیکی از جمله مهمترین نیروهای وارد بر ذرات در یک جدا کننده مغناطیسی تر محسوب می شوند.
نیروی مغناطیسی در جهت جذب ذرات با خاصیت مغناطیسی عمل می کنند در حالی که نیروهای گرانشی و مقاومت هیدرودینامیکی در جهت دیگر با آن مقابله می کنند.

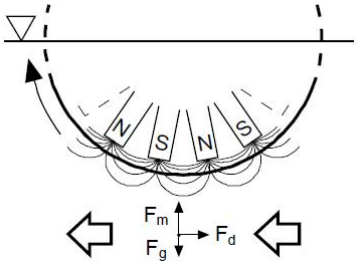
خطوط میدان مغناطیسی تمایل به حرکت به سمت ذراتی با تاثیرپذیری مغناطیسی بیشتر دارند. هنگامی که یک سوسپانسیون از ذرات مغناطیسی در یک میدان مغناطیسی قرار می گیرد خطوط نیرو به سمت این ذرات متمایل می شوند و یک منطقه شدیداً مغناطیسی در جلو و عقب ذرات بوجود می آید. هر ذره برای کم کردن انرژی سیستم، طوری چرخش می نمایدکه حداقل نیرو از طرف میدان را متحمل شود. به این ترتیب ذرات شدیدا مغناطیسی به یکدیگر چسبیده ودر راستای خطوط میدان تشکیل مجموعه های کشیده شده ای را می دهند.

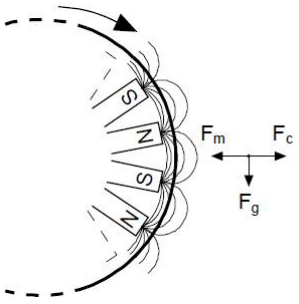




جدایش مغناطیسی - نیروهای درگیر

- **نیروی ثقلی**(Fg) بوسیله اندازه چگالی ذره، تعیین می‌شود.
- **نیروی هیدرولیکی**(Fd) برای جداکننده‌های تر مغناطیسی، توسط قطر ذره، شکل، ویسکوزیته سیال و سرعت محاسبه می‌شود
- **نیروی سانتریفوژی**(Fc) برای جداکننده‌های مغناطیسی خشک چرخان، بوسیله اندازه ذره، چگالی و سرعت استوانه معین می‌شود.
- **نیروی مقاومت هوا**(Fa) برای جداکننده‌های مغناطیسی خشک بوسیله اندازه ذره، چگالی و سرعت هوا مشخص می‌شود.





مثال:

بار ورودی یک جدا کننده مغناطیسی شدت کم خشک را مگنتیتهای تقریباً کروی شکل با جرم مخصوص g/cm3 ۵ تشکیل می دهند. آزمایشات انجام شده نشان می دهد که نیروی وارد شده بر ذرات مگنتیت (بزرگترین ابعاد ذرات cm ۱ است) در حدود ۰/۰۱۹ نیوتن است (dH/dl = ۰/۰۳ T/cm و H =۰/۰۳ T). حال چنانچه گرادیان میدان به ۰/۰۲۲ T/cm کاهش و شدت میدان به ۰/۴۵ T افزایش یابند، آیا همین جدا کننده قادر خواهد بود که جدایش ذرات مگنتیت فوق را ممکن سازد.

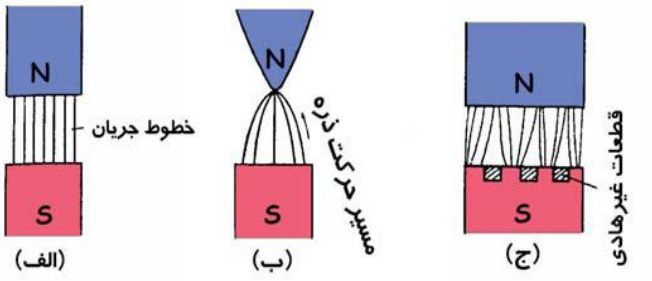
۱۱

جدا کننده های مغناطیسی (Magnetic Separators)

- جداکننده های مغناطیسی 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 پائین و شدت بالا** تقسیم می شوند.
- بر اساس گرادیان میدان مغناطیسی می توان جداکننده ها را به انواع شدت پائین و بالا یا گرادیان پائین و گرادیان بالا نیز تقسیم نمود.
- جداکننده های مغناطیسی شدت پایین جهت جدایش کانی های فرومنیتیت مانند مگنتیت معمولاً از شدت میدانی کمتر ۰/۲ تسلا (۲۰۰۰ گوس) بهره می گیرند.
- جداکننده های شدت بالا اغلب برای جدایش کانی های پارامنیتیت مانند هماتیت و ایلمنیت بکار برده می شوند و شدت میدان آنها معمولاً بیش از ۰/۵ تسلا (۵۰۰۰ گوس) می باشد.

۱۲

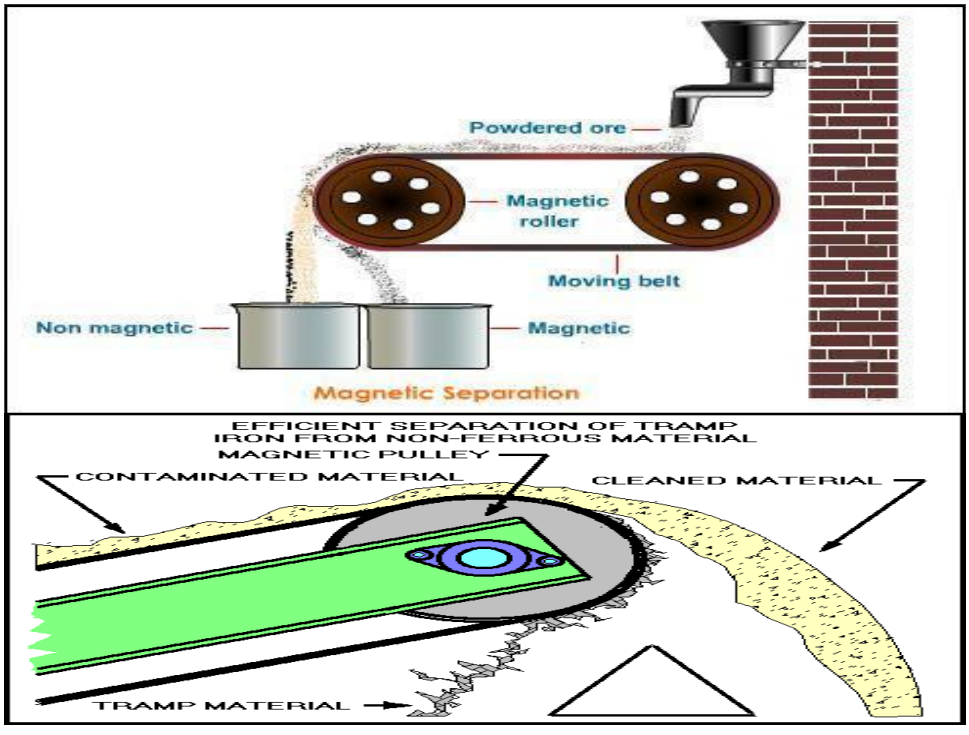
جدا کننده های مغناطیسی



طرح (الف) به لحاظ اینکه گرادیان میدان مغناطیسی صفر است، مطلوب نیست و در نتیجه ذرات حرکت نخواهند کرد. در طرحهای (ب) و (ج) به دلیل وجود گرادیان میدان مغناطیسی، ذره به طرف شدت میدان بیشتر حرکت خواهد کرد.

برای تغییر و تنظیم شدت میدان مغناطیسی در جداکننده های الکترومغناطیسی جریان و در آهن رباهای دایمی فاصله بین دو قطب تغییر داده می شود.
اگر ذرات ریز، شدت میدان بالا و خاصیت تأثیرپذیری ذرات زیاد باشد، خود ذرات به عنوان آهن ربا عمل کرده و همدیگر را جذب می کنند. این توده های مغناطیسی می توانند گانگ را به تله بیاندازند.
مشکل فلوکولاسیون (تجمع) ذرات با گذراندن مواد از میان میدانهای مغناطیسی که قطب های آن معکوس است، به حداقل رسانده می شود.

۱۳

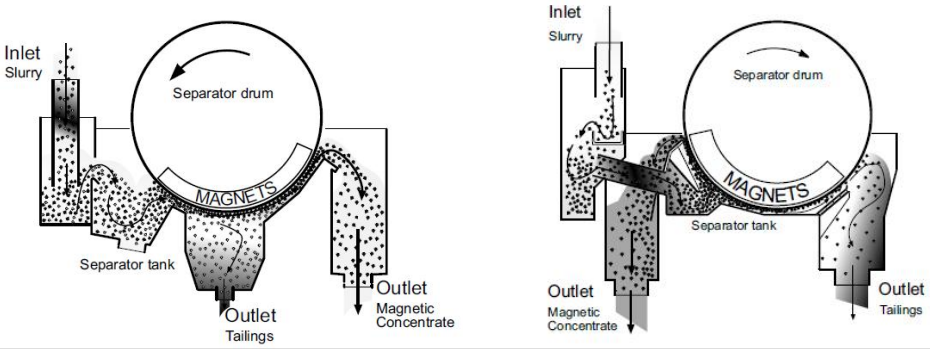


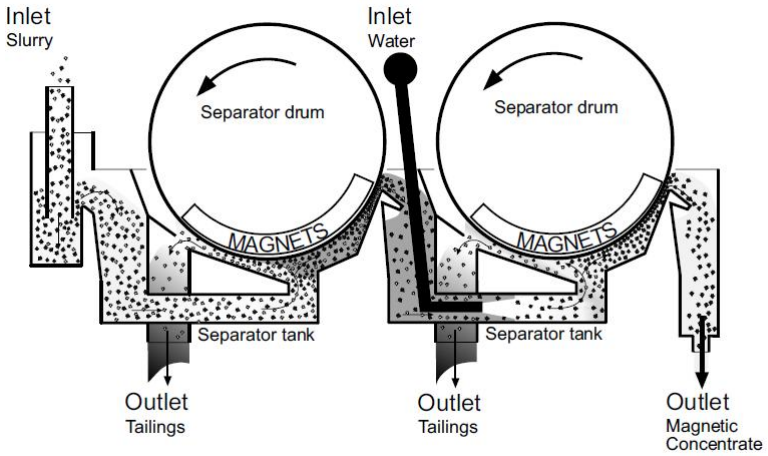
جدا کننده های استوانه ای

جدا کننده های استوانه ای با جدایش خشک برای ذرات درشت (بزرگتر از ۰/۵ میلیمتر) با خاصیت مغناطیسی قوی بکار می رود.

نوع جدا کننده استوانه ای که حرکت پالپ و استوانه در یک جهت است برای کنسانتره با عیار بالا بکار برده می شود.

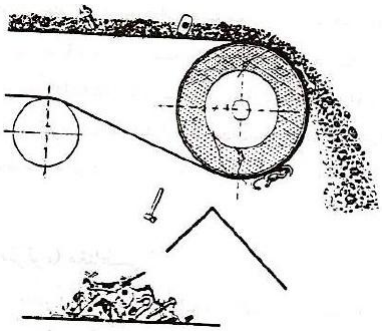
برای مقابله با نوسانات خوراک از جدا کننده استوانه ای که جهت پالپ و استوانه خلاف یکدیگر باشد، استفاده می گردد. در این نوع جدا کنند ه ها، عیار کنسانتره مد نظر نیست.

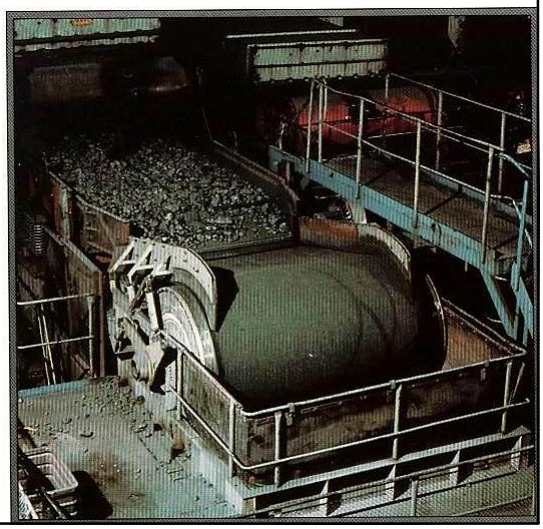




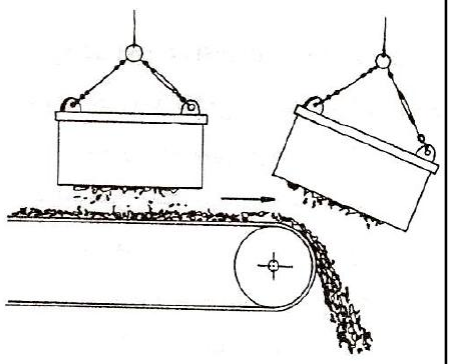
۱۶

با نصب قرقره مغناطیسی در انتهای نوار نقاله می توان به راحتی هر نوع قطعات آهنی را از ماده معدنی جدا نمود.

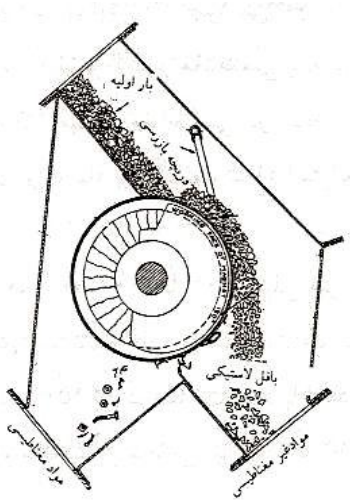




۱۸



جداکننده مغناطیسی معلق

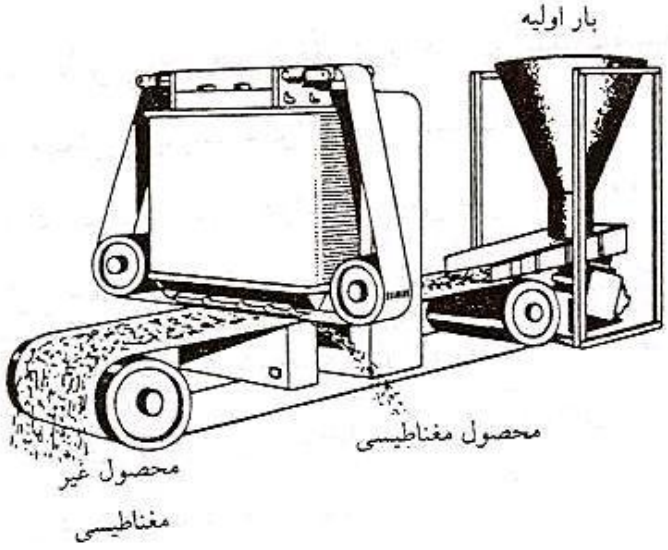


جداکننده استوانه ای برای حذف قطعات آهنی

۱۹

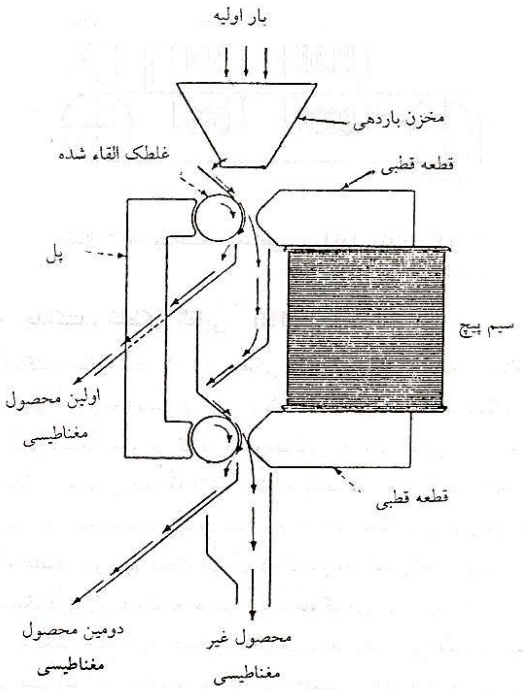
جداکننده های مغناطیسی خشک با شدت زیاد

این نوع جدا کننده ها برای کانیهای پارا مگنتیک خیلی ضعیف بکار می رود.



۲۰

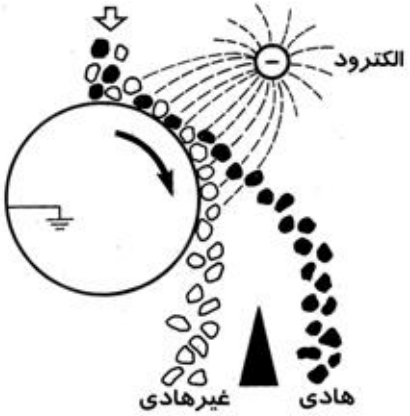
جداکننده های مغناطیسی شدت زیاد



این جدا کننده برای کانه های قلع و ماسه های ساحلی و سنگ فسفات بکار می رود.
گرادیان از طریق ناهموار کردن سطوح غلتکها ایجاد می شود.

جدا کننده های الکترو استاتیکی (Electrostatic Separation)

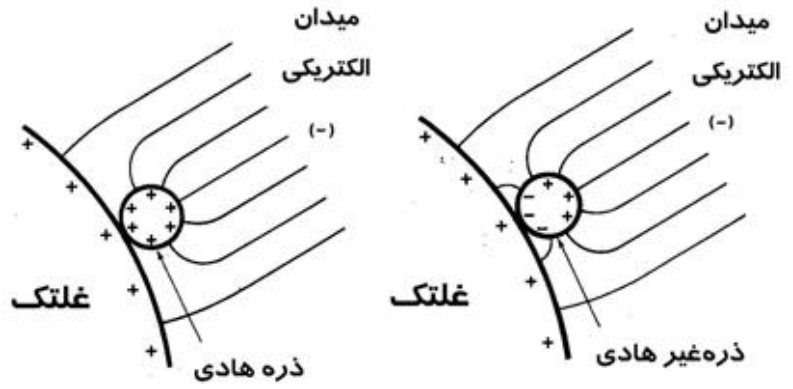
در این نوع جدا کننده ها از اختلاف هدایت الکتریکی کانیها برای جداسازی استفاده می شود.
این جدا کننده ها به آب حساس بوده (به دلیل تغییر هدایت الکتریکی مواد) و ظرفیت آنها کم است.



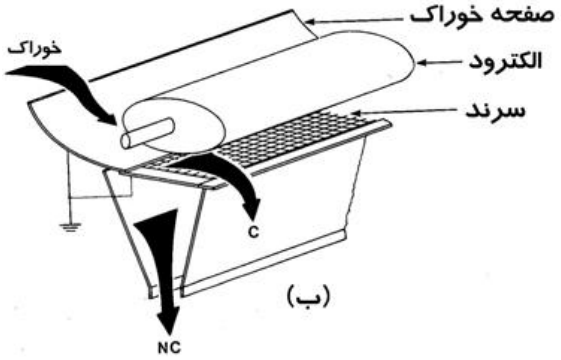
همنام بودن بار ذرات هادی و سطح غلتک و وزن آنها در زمان چرخش استوانه باعث پرتاب آنها می شود.

غیر همنام بودن بار ذرات غیر هادی و سطح غلتک باعث اتصال آنها می شود.

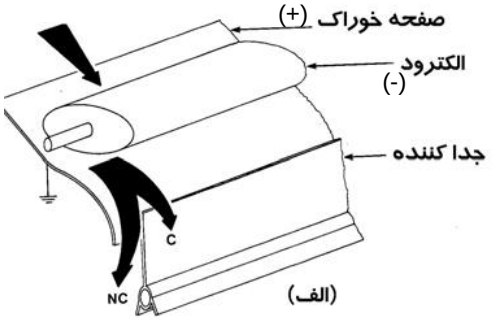
شارژ ذرات توسط القاء کردن



۲۳

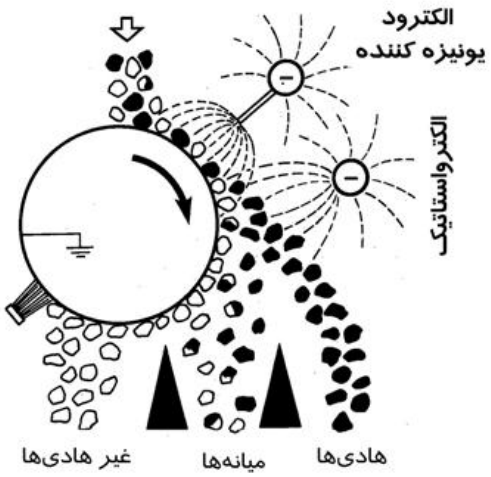


جداکننده های الکترو استاتیک –
(الف) صفحه ای و (ب) شبکه ای



۲۴

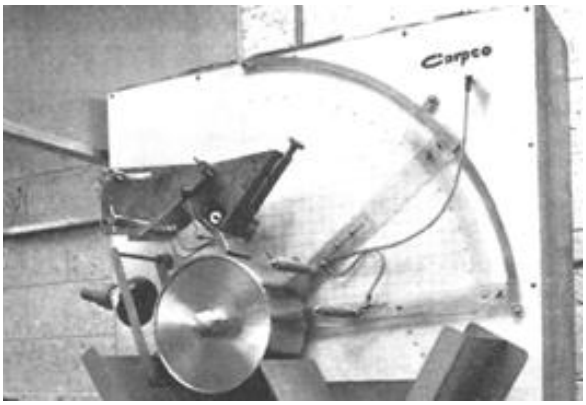
جدا کننده الکترو دینامیک یا جدا کننده با کشش بالا



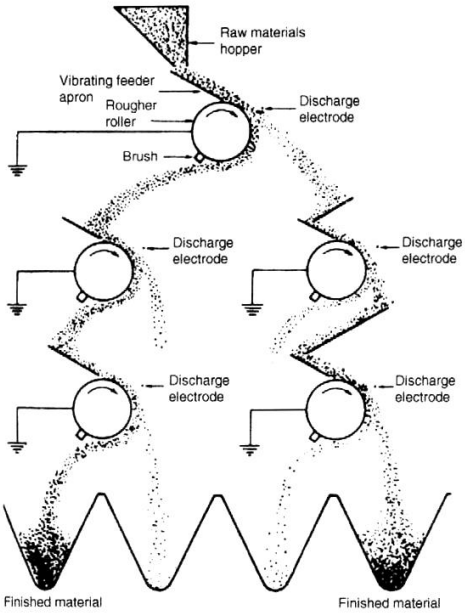
۲۵

جدا کننده الکترو استاتیکی آزمایشگاهی

این روش برای جدا سازی روتیل و ایلمنیت از مونازیت و زیرکن استفاده می شود.



۲۶


Raw materials hopper
Vibrating feeder apron
Rougher roller
Discharge electrode
Brush
Discharge electrode
Discharge electrode
Discharge electrode
Discharge electrode
Finished material
Finished material

٢٧

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

فرآوری مواد معدنی

جلسه های شانزدهم

آبگیری

مدرس:
علی احمدی

1

روشهای آبگیری (جدایش جامد از مایع):

- ته نشینی (Sedimentation)
- فیلتر کردن (Filtration)
- خشک کردن حرارتی (Thermal Drying)

- زمانی که اختلاف زیادی بین دانسیته جامد و مایع وجود داشته باشد، ته نشینی مؤثرترین روش است.
- وقتی که دانسیته جامد و پالپ نزدیک باشد از فیلتر کردن استفاده می شود.
- در مراحل آخر آبگیری، برای اینکه مقدار رطوبت به کمتر از ۵% برسد، از خشک کننده های حرارتی استفاده می شود.

۲

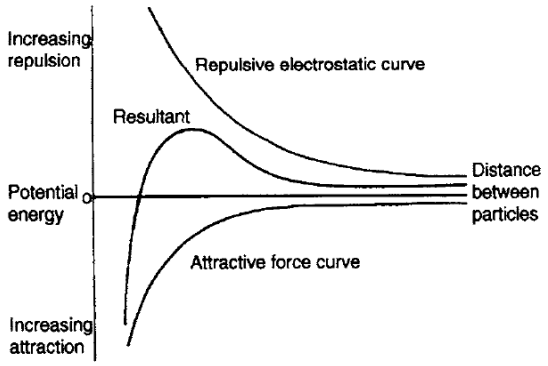
ته نشینی

- ته نشینی سریع ذرات جامد در یک مایع باعث تشکیل دو فاز کاملاً مشخص شفاف (بدون ذرات جامد) و کدر (تجمع ذرات جامد) می شود.
- وقتی که ذرات خیلی ریز (میکرونی) باشند، سرعت سقوط آنها خیلی کم است. برای رفع این مشکل از ته نشینی گریز از مرکز و یا تجمع ذرات ریز استفاده می شود.

۳

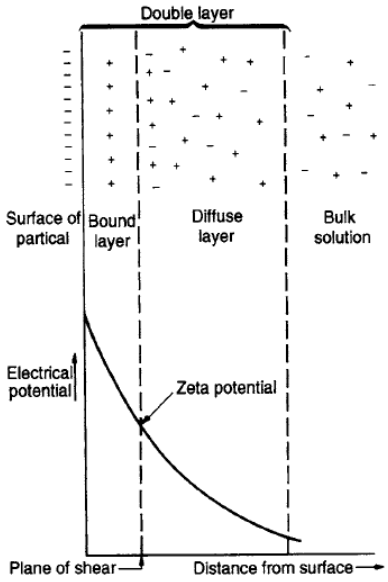
کواگولاسیون و فلوکولاسیون (Coagulation and Flocculation)

- ذرات، نیروهایی که به نیروهای واندروالسی معروفند، بر هم وارد می کنند. این نیروها در فواصل نزدیک مؤثرند.
- به دلیل وجود اتمسفر باردار الکتریکی اطراف هر ذره، نیروی دافعه ای بین ذرات وجود دارد که باعث پراکندگی آنها می شود.
- نیروهای دافعه نه تنها از کواگولاسیون (تجمع) ذرات جلوگیری می کند بلکه افزایش جذب و در نتیجه ته نشینی آنها را نیز آهسته تر می کند.



۴

Potential energy curves for two particles approaching each other



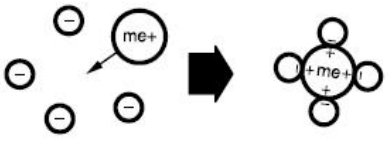
The electrical double layer

۵

ذرات هنگامی همدیگر را جذب می کنند که نیروی جاذبه واندروالسی بر نیروی دافعه الکترواستاتیکی غلبه کند.
ته نشینی به اندازه ذرات بستگی دارد. تجمع ذرات موجب افزایش سرعت ته نشینی آنها می شود.

کواگولاسیون

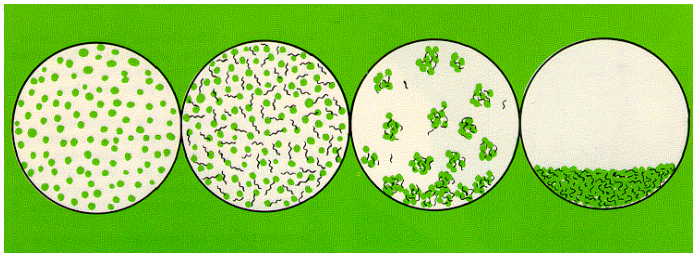
- در کواگولاسیون، بارهاس سطحی ذرات با افزودن مواد شیمیایی با بار الکتریکی مخالف خنثی می شوند. از نمکهای معدنی مثل آهک، سولفات آلومینیوم و سولفات آهن که شامل کاتیونهایی مانند Ca(II)، Al(III)، Fe(III) هستند برای خنثی کردن بارهای منفی روی ذرات استفاده می شود که در نتیجه آن ذرات تجمع کرده و سرعت ته نشینی آنها افزایش پیدا می کند.
- برای خنثی کردن بارهای مثبت از فسفاتها مانند متافسفات سدیم یا کلگون استفاده می شود.



۶

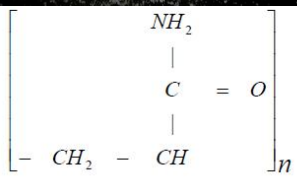
فلوکولاسیون

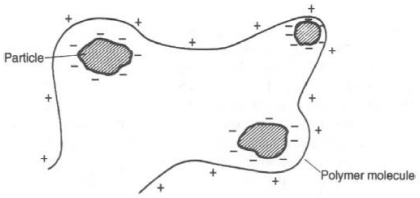
- در فلوکولاسیون از پلیمرهای آلی دارای زنجیره بلند برای درست کردن پل بین ذرات استفاده می شود.
- فلوکولانتها ذرات را به صورت فیزیکی به همدیگر متصل می نمایند.
- انواع فلوکولانت
  - آنیونی (مانند کربوکسی متیل سلولز)
  - کاتیونی (مانند پلی اتیل آمین)
  - غیریونی (مانند پلی اکریل آمیدها، پلی ساکاریدها (نشاسته)، دکسترین)
- پلی آکریل آمید متداول ترین فلوکولانت مورد استفاده در صنعت است:



۷

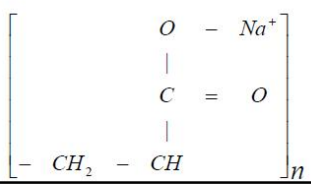
پلی اکریل آمید

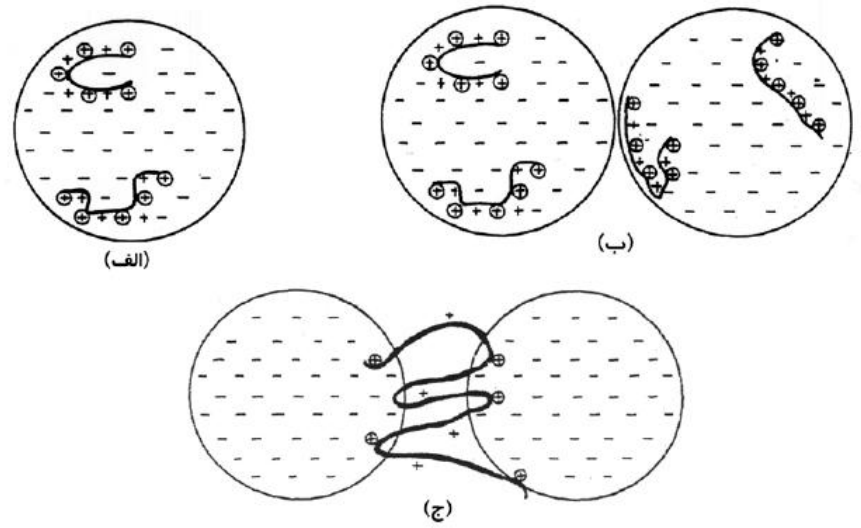




Action of an anionic polyelectrolyte

اگر پلی‌آکریل‌آمید با NaOH کاملاً هیدرولیز شود یک محصول سدیم اکریلیت (Sodium Acrylate) پلی‌الکترولیت آنیونی (Anionic Polyelectrolyte) تولید می‌شود:





نحوه جذب سطحی فلوکولانت

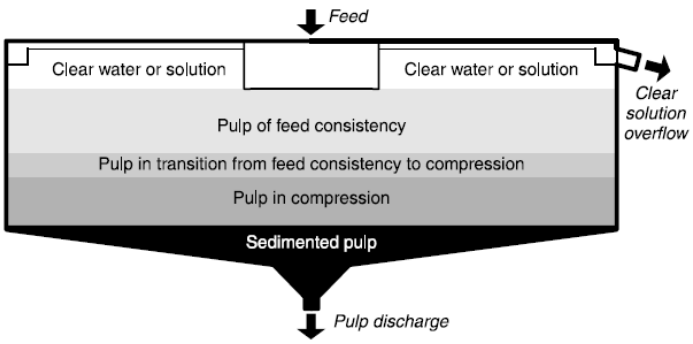
(الف) وصله‌های باردار روی سطح کانی بدلیل جذب بارهای غیر همنام روی سطح کانی و قسمت باردار

(ب) جذب ذرات بدلیل وجود وصله‌های باردار روی یکی از ذرات

(ج) جذب ذرات بدلیل ایجاد پل بین ذرات توسط فلوکولانت

تیکنر کردن

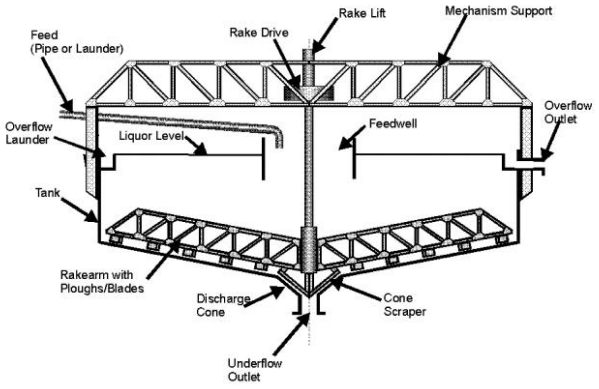
- **تیکنر کردن عبارت است از جدا کردن ذرات جامد معلق از داخل یک مخلوط با استفاده از ته نشینی ثقلی . در تیکنر عملیات ته نشینی بدین صورت است که به ذرات جامد اجازه داده می شود تا تحت نیروی وزن خود در داخل تیکنر ته نشین شوند. می توان چنین گفت که هدف از تیکنر کردن افزایش غلظت ذرات جامد و بدست آوردن ته ریزی با غلظت بالا می باشد.**



تیکنر

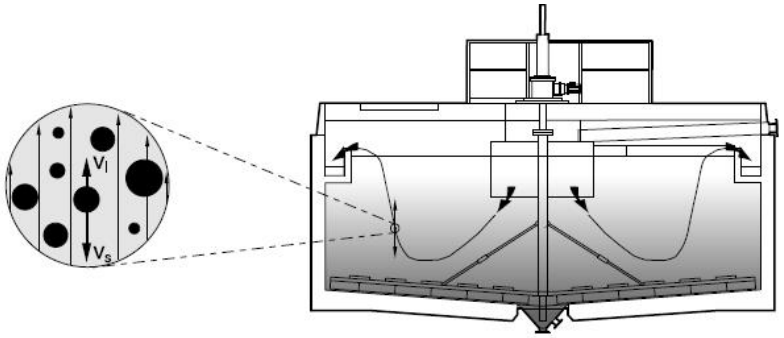
تیکنر پیوسته معمولی از یک حوضچه استوانه ای تشکیل شده است که قطری در حدود ۲ الی ۲۰۰ متر و عمق ۱ الی ۷ متر می باشند. پالپ اولیه از طریق چاهک خوراک دهی که در وسط تیکنر قرار دارد وارد تیکنر می شود. ذرات جام تحت اثر نیروی وزن خود به سمت پایین ته نشین می شوند. با افزایش عمق غلظت این ذرات جامد بیشتر می شود. پالپ غلیظ شده به سمت نقطه تخلیه که در وسط قسمت تحتانی تیکنر قرار دارد کشانده می شوند و آن قسمت از مایع که از پالپ جدا شده است، از سرریز تیکنر به بیرون هدایت می شود. به منظور سهولت در تخلیه ذرات جامد ته نشین شده قسمت تحتانی تیکنر را کمی شیب دار به سمت نقطهٔ تخلیه ساخته و همچنین تعدادی پارو در قسمت تحتانی قرار می دهند تا ذرات جامد ته نشین شده را به سمت نقطه تخلیه هدایت کنند. غلظت در ته ریز نباید از یک حد مشخص بیشتر شود.

۱۱

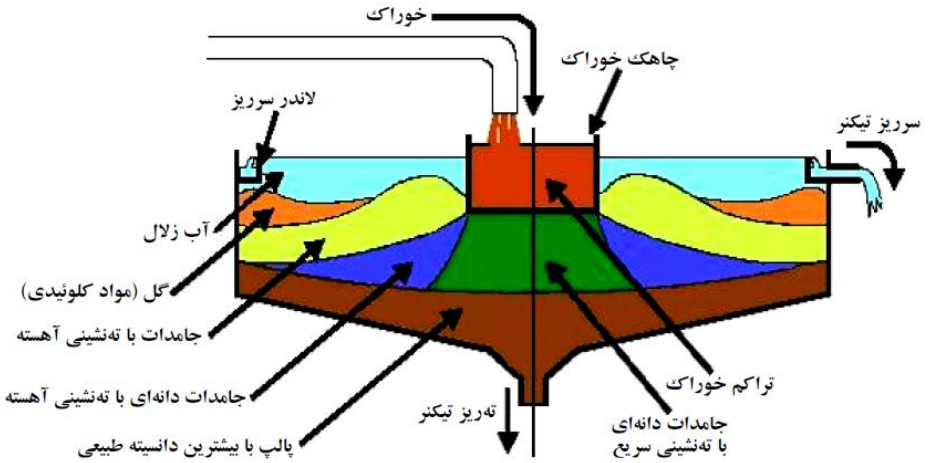


۱۲

هدف اصلی از تیکنر کردن تولید یک سرریز زلال و یک ته ریز غلیظ است.
برای یک ورودی معین ظرفیت جداسازی توسط قطر تیکنر مشخص می شود .
اندازه سطح یک تیکنر بایستی طوری باشد که سرعت بالا رفتن آب جابجا شده (Vl)
در هر ناحیه همیشه از سرعت نشست ذرات (Vs) کمتر باشد.

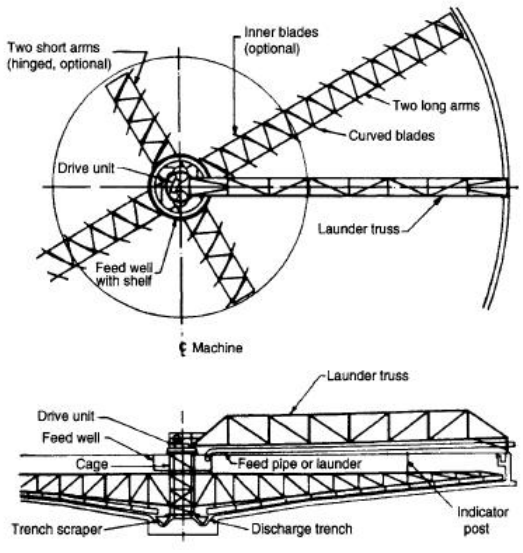


۱۳



۱۴

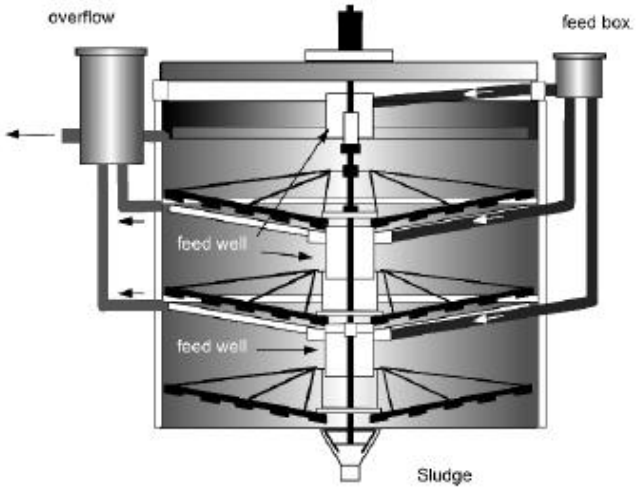
١٥



Thickener with column supported by centre column

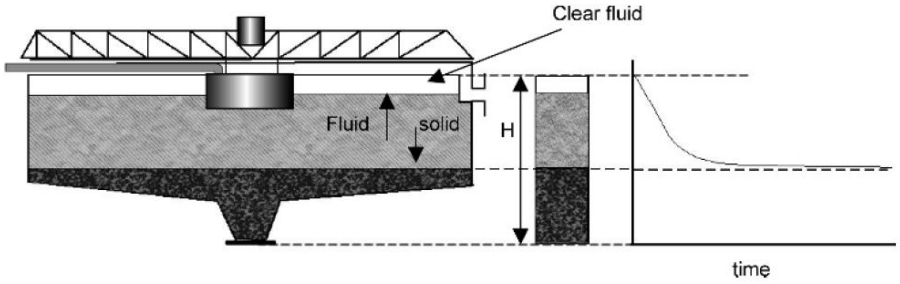
١٦

Schematic diagram of a tray type clarifier



١٧

Sedimentation in a thickener



١٨

تعیین مساحت تیکنر به‌روش Coe and Clevenger

مقدار آبی که از ته‌ریز به ناحیه بالا حرکت می‌کند $(F-D)W$ =

سرعت جریان مورد نظر (m/h) : $R = \frac{(F-D)W}{AS'}$

F: نسبت وزنی مایع به جامد در هر ناحیه داخل تیکنر

D: نسبت وزنی مایع به جامد در ته‌ریز

W: دبی جامد خشک خوراک تیکنر (t/h)

A: مساحت تیکنر (m^2)

S': وزن مخصوص آب (kg/l)

چون این سرعت بالارونده نبایستی از سرعت ته‌نشینی جامد در این ناحیه بیشتر باشد:

$$A = \frac{(F-D)W}{RS'}$$

R: سرعت ته‌نشینی ذرات (m/h)

با محاسبه مساحت سطح تیکنر در غلظت های مختلف (در راستای قائم تیکنر) در نهایت بیشترین مساحت محاسبه شده به عنوان سطح مورد نظر انتخاب می گردد.

۱۹

مثال:

قرار است درصد جامد پالپ حاوی ذرات کوارتز با استفاده از یک تیکنر از ۱۵ % به ۶۵% برسد . با توجه به اطلاعات زیر، قطر تیکنر لازم برای ۱۰ تن بر ساعت ماده ورودی به تیکنر را محاسبه کنید.

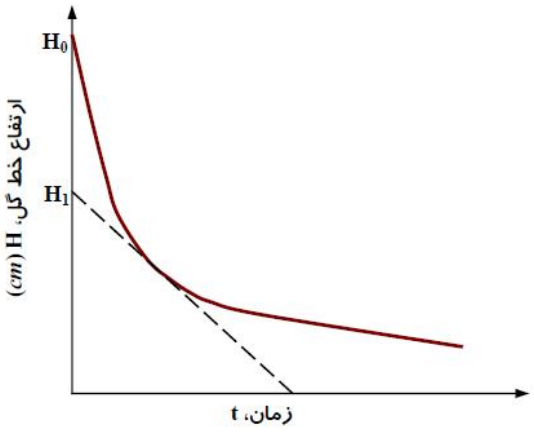
درصد جامد:	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵	۶۵
سرعت ته‌نشینی (m/h):	۰/۹۸	۰/۵۲	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۵

۲۰

۲۱

تعیین مساحت تیکنر به روش Talmge و Fitch

- در روش قبلی تعداد زیادی آزمایش بایستی انجام می شد ولی در این روش فقط به یک آزمایش ته نشینی نیاز است.



نمودار ته‌نشینی آزمایشگاهی (بسته)

۲۲

موازنه جرم در زمانهای مختلف: $C_0H_0A = CHA$

C_0: غلظت جامد خوراک *(kg/l)*

H_0: ارتفاع اولیه خط گل *(cm)*

C: غلظت جامد در نقطه مماس رسم شده *(kg/l)*

H: ارتفاع خط گل برای پالپ با غلظت جامد C *(cm)*

به عبارت دیگر، برای هر ارتفاع دلخواهی:

$$C_0H_0 = CH$$

برای پالپی با مقدار جامد $C(kg/l)$:

وزن جامد در یک لیتر پالپ = $C\ kg/l \times 1\ l = C\ kg$

d: وزن مخصوص جامد خشک *(kg/l)*

وزن آب در یک لیتر پالپ = $\left(1 - C/d\right) \times 1 = 1 - C/d\ kg$

بنابراین نسبت آب به جامد بر حسب وزن (F) برابر است با:

$$F = \frac{1 - C/d}{C} = \frac{d - C}{dC}$$

و برای پالپی با مقدار جامد $C_u\ kg/l$، نسبت آب به جامد (D) برابر است با:

$$D = \frac{d - C_u}{dC_u}$$

با توجه به رابطه قبلی:

$$A = \frac{(F - D)W}{RS'}$$

و با جایگزینی دو رابطه بالایی معادله زیر حاصل می‌شود:

$$A = \left(\frac{d - C}{dC} - \frac{d - C_u}{dC_u}\right)\frac{W}{RS} = \left[\frac{1}{C} - \frac{1}{C_u}\right]\frac{W}{RS'}$$

۲۴

مثال:

سطح تیکنر لازم برای تبدیل کردن پالپ ۰/۲ kg/m3 کالکوپیریت به ته ریز kg/m3 ۰/۶ را محاسبه کنید.

مقدار جامد؛ ***C (kg/l)***	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۶۰
سرعت ته نشینی؛ ***R (m/h)***	۰/۹	۰/۵	۰/۳	۰/۰۸	۰/۰۵

۲۵

تعیین عمق تیکنر

حداقل زمانی که پالپ بایستی در تیکنر صرف کند تا درصد جامد آن برابر درصد جامد مورد نظر باشد مشخص کننده حداقل عمق تیکنر است. این زمان، اختلاف بین زمان تراکم (*tc*) و زمان رسیدن به درصد جامد ته ریز (*tu*) مورد نظر می باشد.

$$t = t_u - t_c$$

$$d = \frac{Qt}{A} \quad , \quad Q = \frac{\frac{1}{\rho_s} + \frac{D'}{\rho_l}}{1} \quad , \quad \rho_P = \frac{1 + D'}{1/\rho_s + D'/\rho_l} \Rightarrow D' = \frac{\rho_l(\rho_s - \rho_p)}{\rho_s(\rho_p - \rho_l)}$$

d: عمق تیکنر *(m)*

Q: دبی پالپ برای یک تن ماده خشک در ساعت *(m^3/h)*

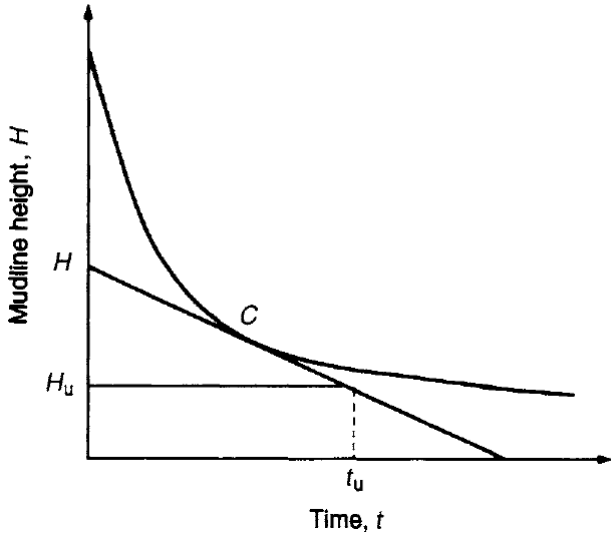
D′: جرم آب به‌ازای ۱ تن جامد خشک *(t)*

ρ_P: دانسیته پالپ *(t/m^3)*

با جایگزینی در رابطه بالا:

$$d = \frac{(\rho_s - \rho_l)t}{\rho_s(\rho_p - \rho_l)A}$$

به این مقدار بایستی ۳۰-۹۰*cm* به‌عنوان منطقه آب شفاف اضافه شود.



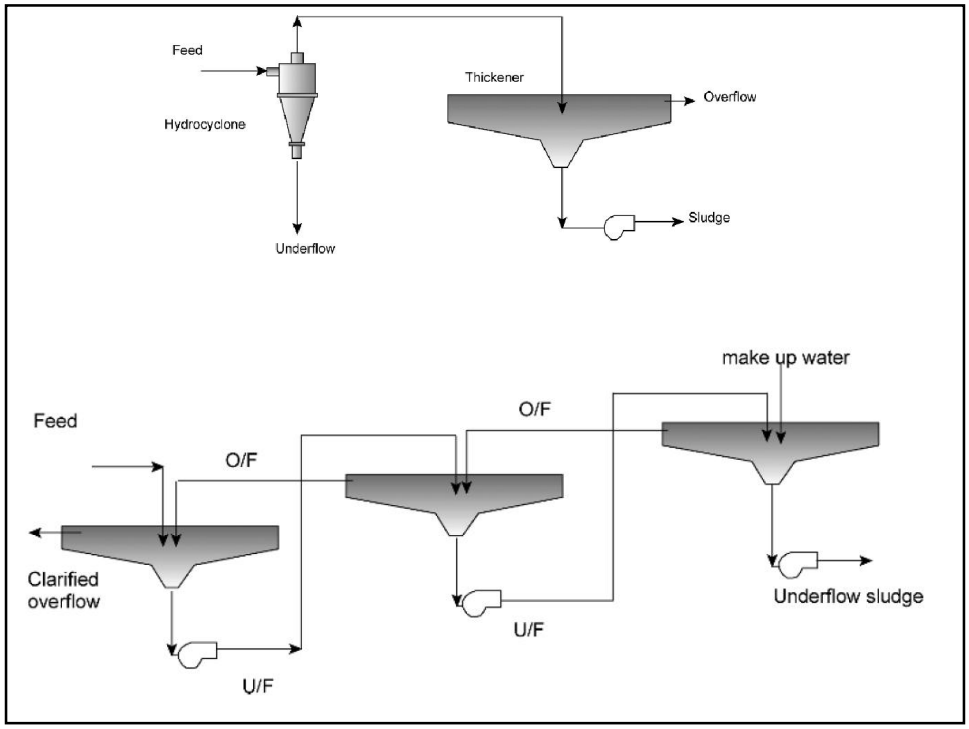
۲۷

مثال:

عمق تیکنری را که سطح آن برای هر تن جامد خشک در ساعت $m2$ ۳ تعیین شده است را با توجه به اطلاعات داده شده محاسبه کنید.

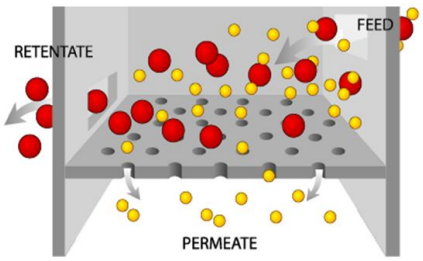
این تیکنر قرار است پالپی با ۲۰ % جامد (دانسیته جامد) را به ۷۵ % برساند . در آزمایشگاه مشخص شده است که تفاوت زمان نقطه تراکم و نقطه ای که درصد جامد آن ۷۵ می باشد، ۰/۵ ساعت است.

۲۸



فیلتراسیون

- فرآیند جدا کردن جامد از مایع با استفاده از یک محیط متخلخل، فیلتر کردن، نام دارد . مواد جامد (کیک) روی محیط متخلخل باقی می ماند و آب از آن عبور می کند.
- عوامل مؤثر در فیلتر کردن:
- ۱) افت فشار در دو طرف محیط متخلخل
- ۲) مساحت سطح فیلتر کننده
- ۳) ویسکوزیته مواد فیلتر شونده
- ٤) مقاومت کیک و محیط متخلخل



فیلتراسیون

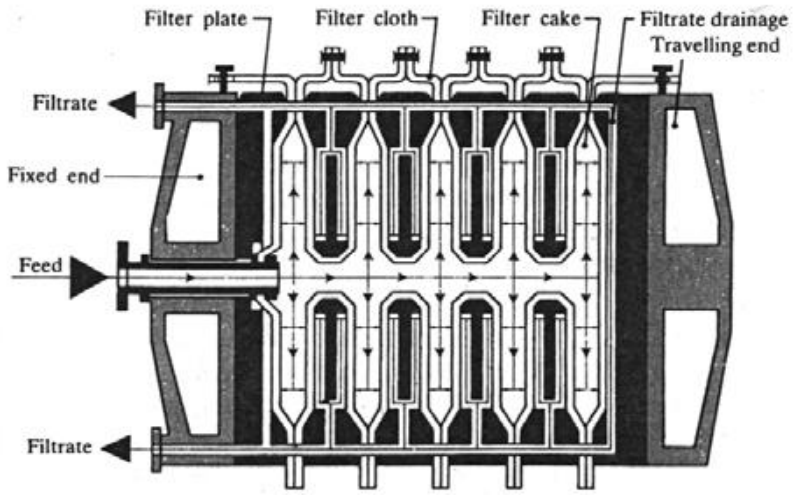
- فیلتر از سطح متخلخلی که منافذ آن برای عبور مایع مناسب هستند، ولی از عبور دانه های جامد جلوگیری می کنند، تشکیل شده است. عبور مایع از سطح فیلتر در اثر ایجاد اختلاف فشار در دو طرف آن انجام می شود. مواد به صورت پالپ از سمتی که فشار بیشتر باشد با این سطح در تماس قرار می گیرند. در نتیجه آب موجود در پالپ از این سطح عبور می کند و دانه های جامد به صورت کیکی بر روی آن باقی می مانند. اختلاف فشار ممکن است صرفاً ناشی از وزن پالپ موجود بر روی سطح فیلتر باشد، یا با ایجاد فشار اضافی بر روی سطح فیلتر بدست آید و یا سرانجام به کمک نیروی گریز از مرکز حاصل شود.

انواع فیلتر

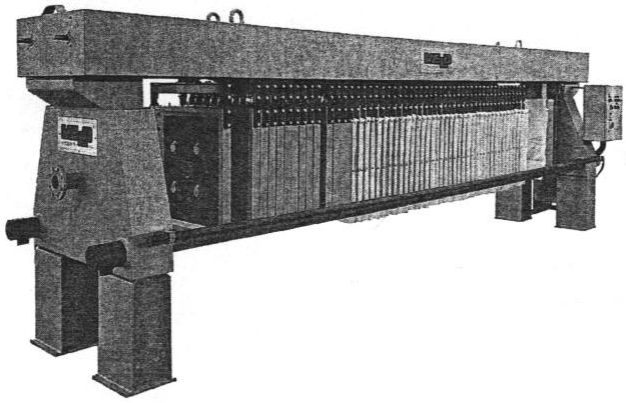
- ۱) فیلترهای فشاری
- ۲) فیلترهای خلاء

۳۱

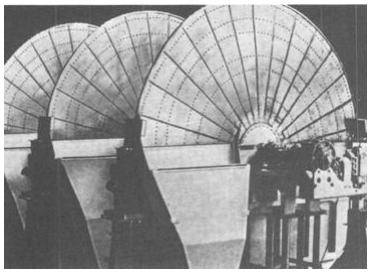
فیلتر فشاری



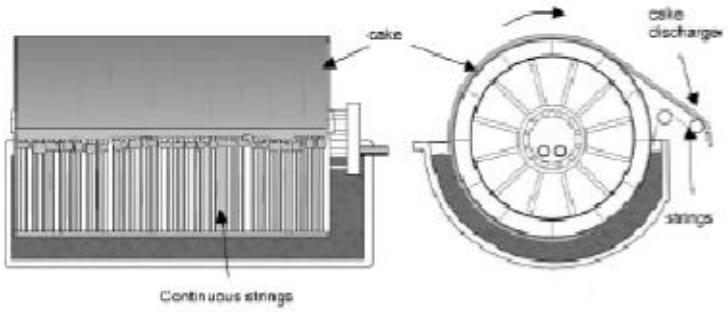
۳۲



۳۳

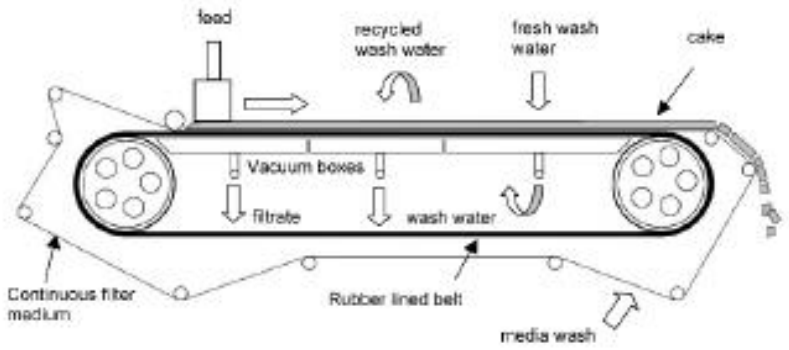


فیلترهای خلاء



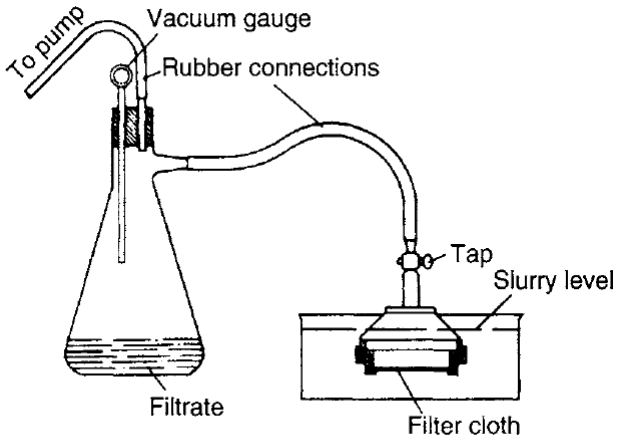
۳۴

فیلتر نواری



۳۵

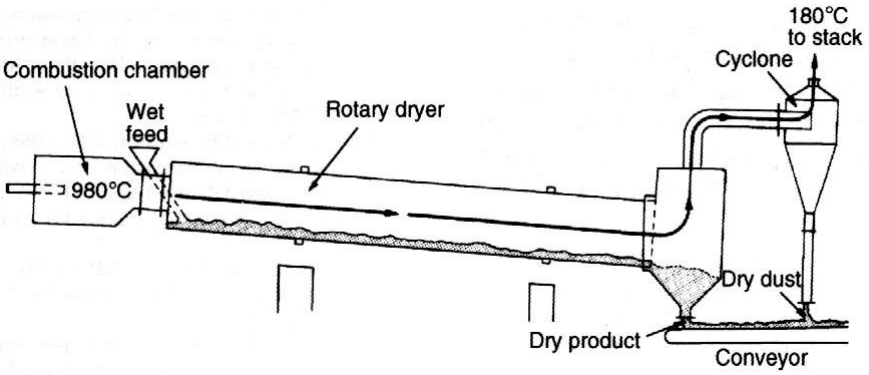
تست فیلتراسیون برای ارزیابی تأثیر شرایط عملیاتی نظیر کمک فیلتر، پارچه فیلتر و ...



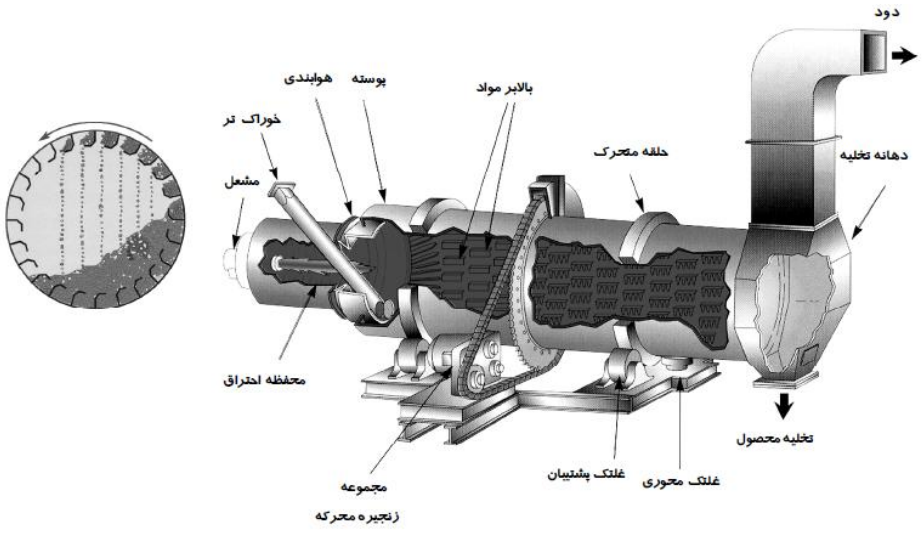
Laboratory test filter

۳۶

خشک کردن



۳۷



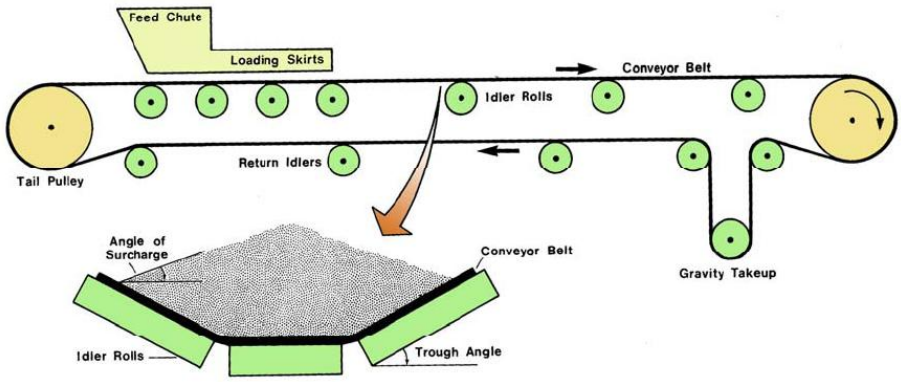
۳۸

پایان

۳۹

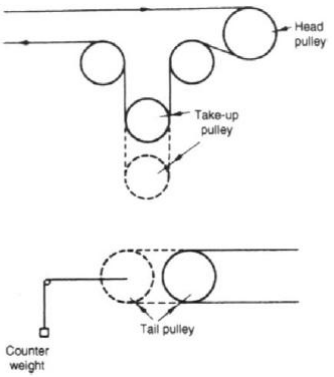
انتقال مواد

امتحان پایانترم شامل بخش های انتقال و سنگ جوری اسلاید نمی باشد.

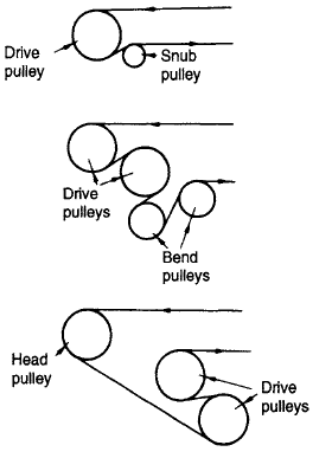


۴۰

نحوه قرارگیری نوار نقاله و سیستم کشش نوار نقاله



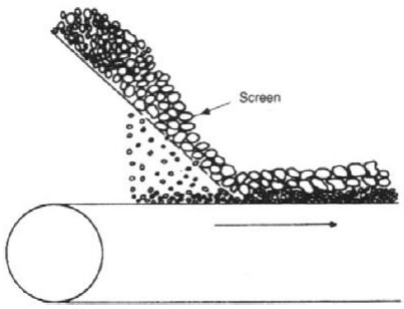
Conveyor-belt tensioning systems



Conveyor-belt drive arrangements

۴۱

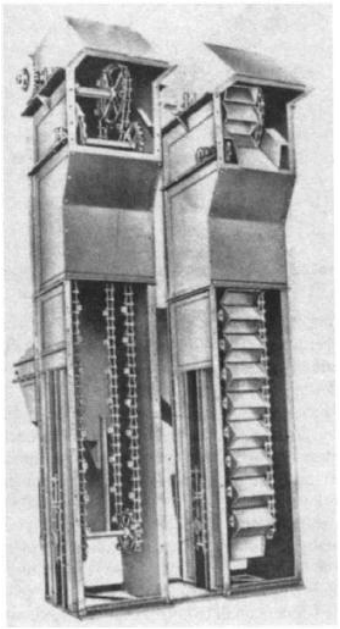
سیستم باردهی نوار نقاله



Belt-loading system

۴۲

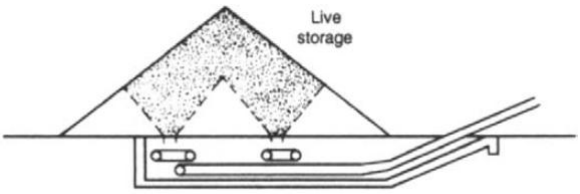
آسانسور سطلی



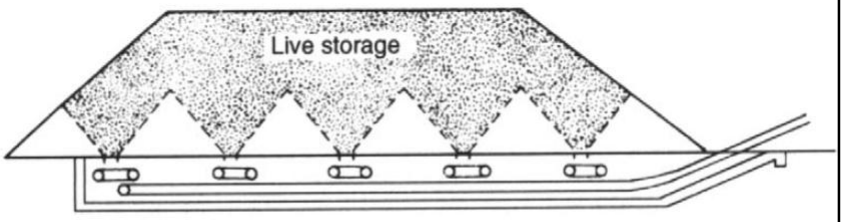
Gravity bucket elevator

در جایی که محدودیت فضا وجود دارد بکار برده می شود.

ذخیره کانه

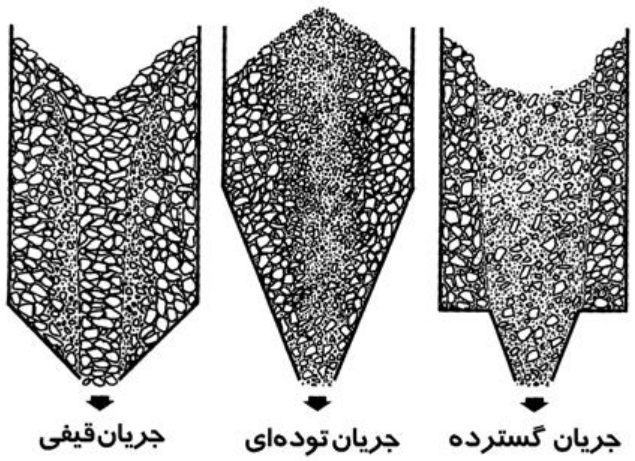


Reclamation from conical stock pile



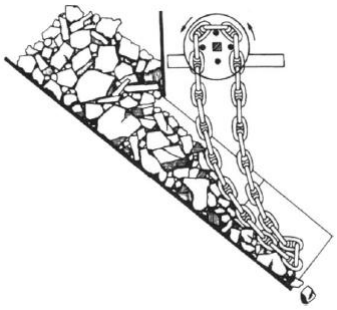
Reclamation from elongated stock pile

ذخیره کانه (سیلو)

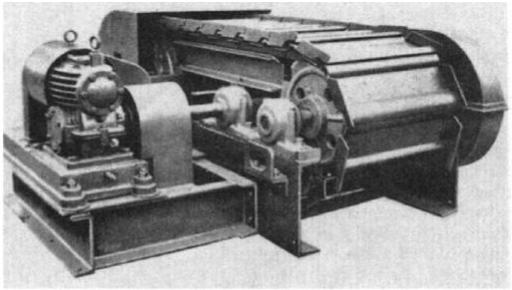


۴۵

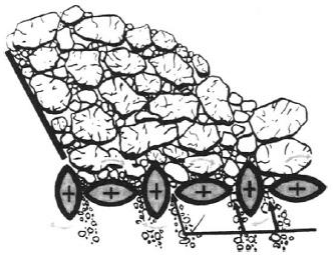
خوراک دهی



Chain-feeder



Apron feeder



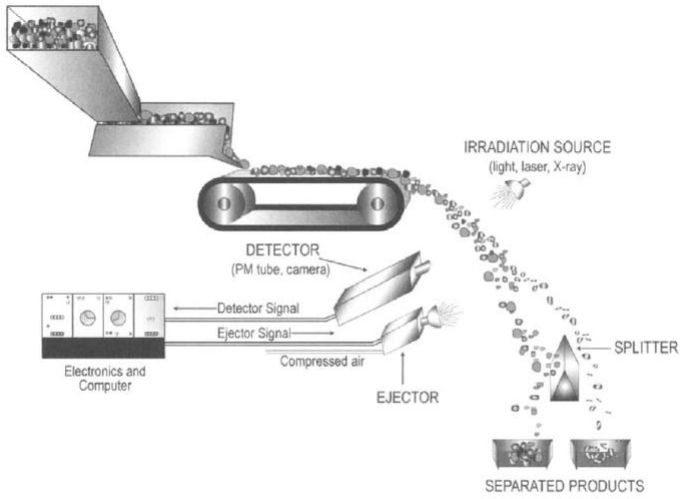
خوراک دهنده لرزان

سنگ جوری

- دستگاه های سنگ جوری با بررسی جریان مواد، تفاوت در خواص فیزیکی معینی را در بین آنها اندازه گیری می کنند و با فرستادن علامت (سیگنال) به وسایل مکانیکی یا الکتریکی، ذرات با ارزش را از جریان جدا می کنند.
- نور لیزری برگشتی از سطح کانیها اندازه گیری می شود و چون شدت این نور به خواص نوری کانی بستگی دارد، در نتیجه می توان آنها را از هم جدا نمود.
- در صورت مناسب بودن شدت نور برگشتی، برای دستگاه هوای فشرده جهت جدا کردن کانی علامتی فرستاده می شود.
- در سنگ جوری تمام اتوماتیک، عکس برداری کامل از ذرات و مقایسه آنها با بانک اطلاعاتی توسط کامپیوتر برای قبول یا رد آنها صورت می گیرد. فعال کردن خودکار شیر مربوط به منطقه ای که قرار است کانه ای از جریان جدا شود، از خصوصیات این نوع سنگ جوری می باشد.

۴۷

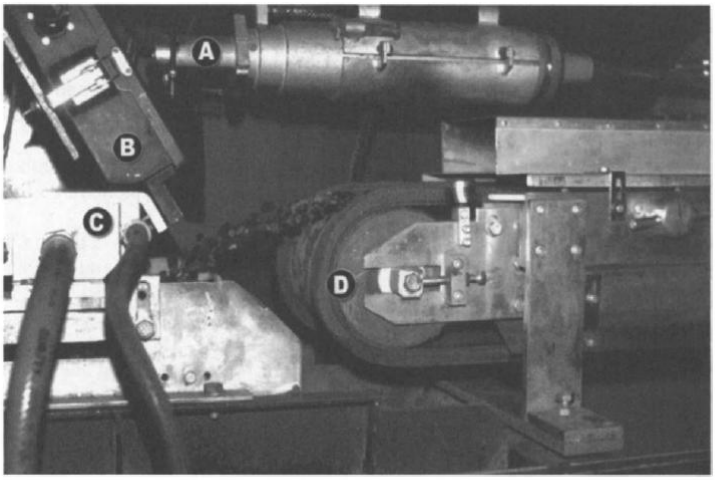
اصول سنگ جوری الکترونیکی



Principles of photometric sorting

۴۸

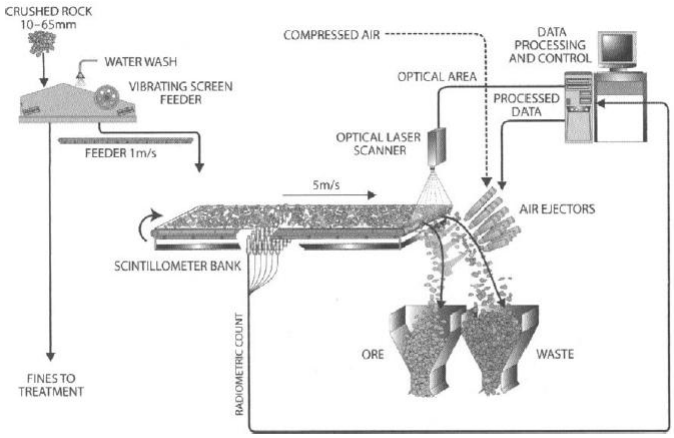
سنگ جوری الماس



Early diamond sorter. A: X-Ray generator; B: Photomultiplier tubes; C: Air ejectors; D: Feed belt (Courtesy JKMRC and JKTech Pty Ltd)

سنگ جوری رادیومتری

امتحان پایانترم شامل انتقال و سنگ جوری اسلاید نمی باشد.



The Ultrasort radiometric sorter (Courtesy Ultrasort Pty Ltd)

۵۰

پیش فرآوری کانه اورانیوم (اشعه گاما)