

فلوتاسیون

ویژه دانشجویان مهندسی معدن، گرایش استخراج

حمید خوشدست

بخش مهندسی معدن، دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

ویرایش اول، ۱۳۹۱

فصل اول

مبانی و اصول فلوتاسیون مواد معدنی

۱-۱- مقدمه

فلوتاسیون (Flotation) کارآمدترین و همه‌جانبه‌ترین روش کانه‌آرایی است. در این روش، مواد با ارزش (فلوتاسیون مستقیم) و یا بی‌ارزش (فلوتاسیون معکوس) به دلیل خواص فیزیک/ شیمیایی خاص سطحی (طبیعی یا اصلاح شده) به حبابهای هوا می‌چسبند و به صورت کفی باردار از سیستم خارج می‌شوند. این روش به لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. فلوتاسیون روشی انتخابی بوده و با استفاده از آن می‌توان کانه‌های پیچیده‌ای مانند مس/ سرب/ روی را به طور انتخابی فرآوری نمود.

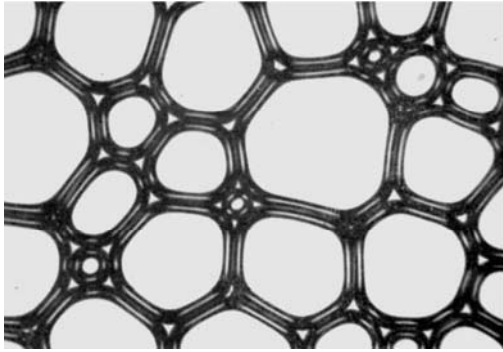
۱-۲- کف و انواع آن

هرگاه دو حباب با یکدیگر تماس پیدا کنند، لایه سیال بین آنها به تدریج نازک می‌شود تا در نهایت گسیخته شده و حبابها با یکدیگر ادغام گردند. چنانچه به هر دلیلی از ادغام حبابها جلوگیری شود، حبابهای پایدار به سمت سطح سیال حرکت کرده و در آنجا تجمع می‌یابند و کف را تشکیل می‌دهند.

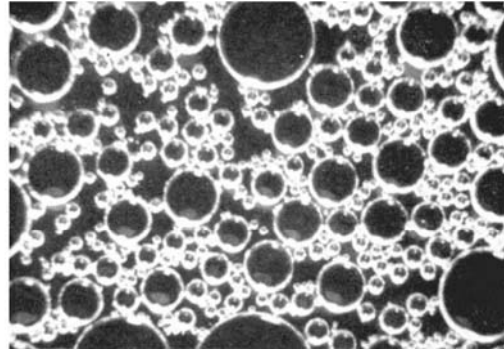
عبارت کف در زبان فارسی معادل دو کلمه لاتین froth و foam است. با توجه به منابع موجود، می‌توان دو تعریف متفاوت را برای این دو کلمه ارائه داد:

- سیستمهای سیال/ حبابی که بطور ناقص زهکشی شده باشند (که معمولاً ناپایدار هستند) foam نامیده می‌شوند؛ در حالی که سیستمهای پایداری که در آنها زهکشی سیال از میان

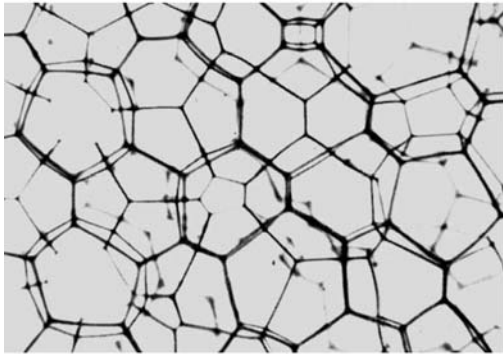
حبابها به نحو مطلوب صورت گرفته باشد را froth می‌نامند. در شکل ۱-۱ مراحل تبدیل foam به froth نشان داده شده است.



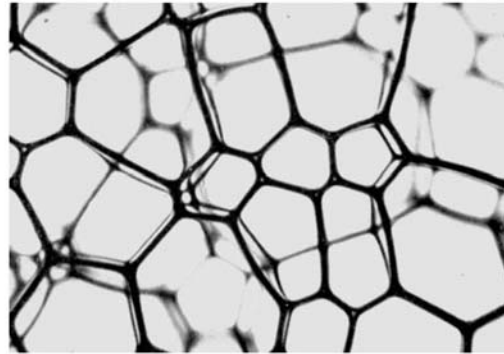
(ب)



(الف)



(د)

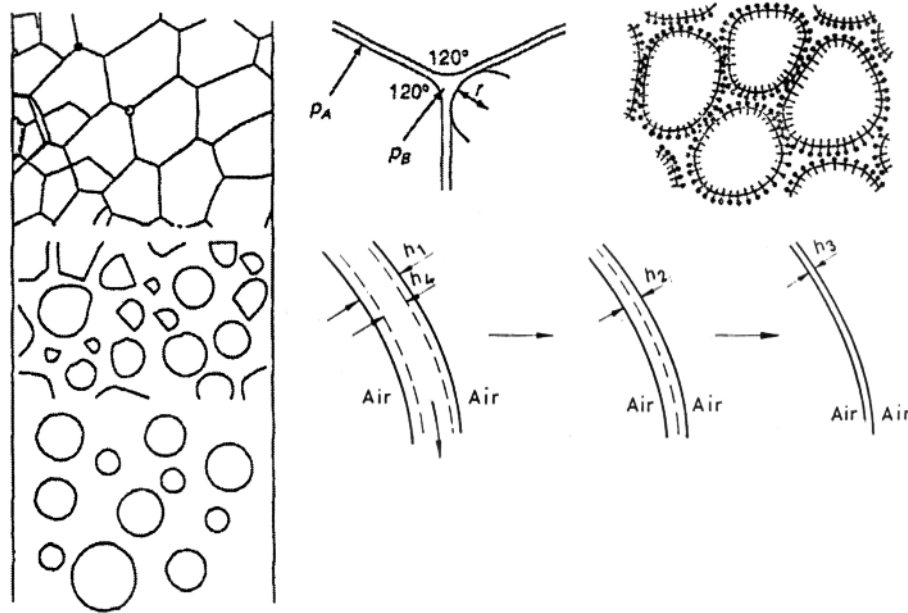


(ج)

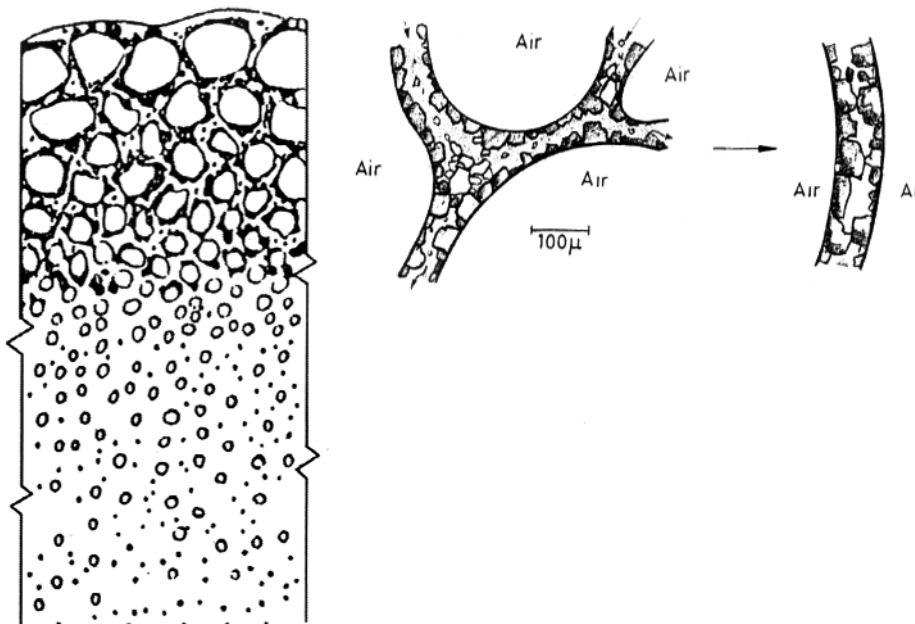
شکل ۱-۱- تغییر ساختار تجمع حبابها از foam به froth: (الف) foam با حبابهای کروی و بدون زهکشی، (ب) foam با زهکشی جزئی و لایه سیال ضخیم، (ج) تشکیل لایه نازک بین حبابها با حاشیه‌های زاویه‌دار، و (د) تشکیل froth با حبابهای چندضلعی و زهکشی مناسب

• foam سیستمی دو فاز از هوا و مایع است در حالی که froth حاوی ذرات جامد نیز می‌باشد. ساختار این دو نوع کف در شکل‌های ۱-۲ و ۱-۳ نشان داده شده است.

نکته بارز در هر دو تعریف، پایداری کمتر foam نسبت به froth است. در froth، پایداری به طور غالب از عملکرد پایدارکنندگی ذرات ناشی می‌شود.



شکل ۱-۲- ساختار کفهای دو فازی و مکانیزمهای حاکم



شکل ۱-۳- ساختار کفهای سه فازی و مکانیزمهای حاکم

۳-۱- فازهای فلوتاسیون

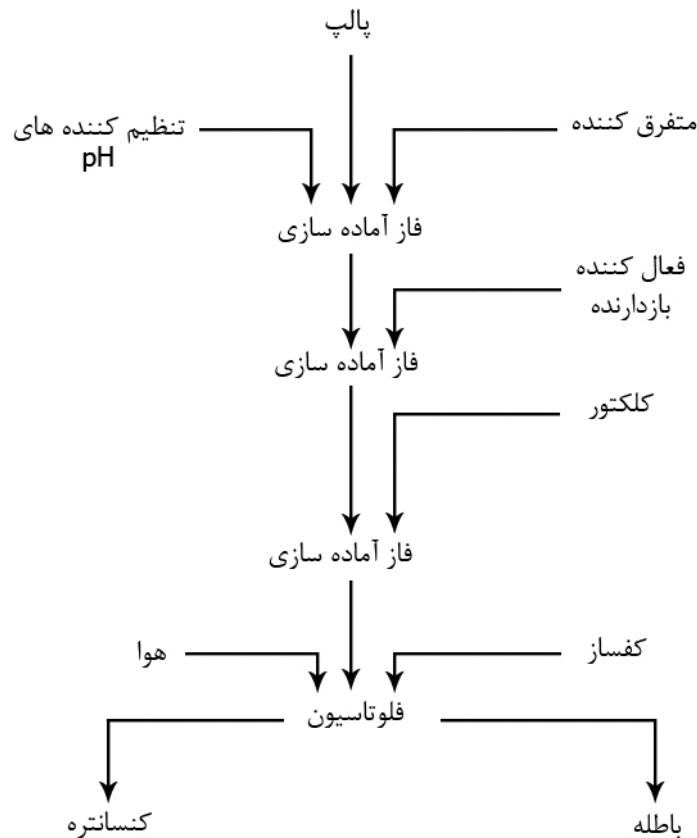
فلوتاسیون تنها روش فرآوری است که به طور همزمان از سه فاز جامد، مایع و گاز بهره می‌برد. این سه فاز به نوبه خود سه فصل مشترک جامد/مایع، جامد/گاز و مایع/گاز را تشکیل می‌دهند.

- فاز گاز: متداول‌ترین گاز، هوا می‌باشد (H_2S و CO_2 ، H_2 ، N_2 ، O_2).
- فاز مایع: فاز مایع همیشه یک محلول آبی است زیرا آب مایعی ارزان، قابل دسترسی و قابل بازیافت می‌باشد.
- فاز جامد: فاز جامد از کانیهای مختلف تشکیل شده است. شناخت ویژگی‌های بلورشناسی و کانی‌شناسی این فاز بسیار مهم است.

۱-۴- اصول فلوتاسیون

اساس فرایند فلوتاسیون، حمل انتخابی ذرات توسط حبابهای هوا به سطح پالپ و تخلیه به صورت کف می‌باشد.

مراحل درگیر در هر عملیات فلوتاسیون عبارتند از (شکل ۱-۴):



شکل ۱-۴- نمودار ساده مراحل یک فلوتاسیون

- خوراک اولیه پس از خردایش تا ابعاد مناسب (معمولاً ۲۰۰-۷۵ میکرون) به صورت پالپی با درصد جامد معین (۲۵ تا ۴۵ درصد) وارد مرحله آماده‌سازی می‌شود.
- در این مرحله، محیط پالپ و خواص سطحی ذرات بهینه می‌شوند.
- سطح اکثر کانیها در تماس با آب تر می‌شود (آبدوست hydrophilic). برای آبران کردن (hydrophobic) سطح کانیهای مورد نظر جهت اتصال به حبابها، از کلکتورها (collector) استفاده می‌شود.
- جهت سرعت بخشیدن به عملکرد کلکتور و یا جلوگیری از آن از تنظیم‌کننده‌ها (modifier یا regulator) استفاده می‌گردد. برای مورد اول از فعال‌کننده‌ها (activator) و برای مورد دوم از بازدارنده‌ها (depressant) استفاده می‌شود.
- حباب در سلولهای مکانیکی با همزن، در ستونها با حباب‌ساز و در سلول جیمسون با ایجاد خلأ تولید می‌شود.
- ذرات آماده شده به حبابها می‌چسبند و به سطح پالپ حرکت می‌کنند.
- برای جلوگیری از ادغام حبابها در پالپ و کف (coalescence) و ترکیدن حبابها در سطح کف (bursting) از کفسازها (surfactant یا frother) استفاده می‌شود.

حضور ذرات بسیار ریز (نرمه‌ها) در محیط پالپ، کارایی عملیات فلوتاسیون را به دلیل تغییر خواص سطحی ذرات (تجمع نرمه‌ها روی سطح ذرات درشت‌تر)، فلوتاسیون کاذب (تشکیل توده نرمه‌ها) و یا پدیده دنباله‌روی، کاهش می‌دهد. برای رفع مشکل نرمه‌ها، دو تدبیر در نظر گرفته می‌شود: تهیه پالپ با خوراک نرمه‌گیری شده و استفاده از متفرق‌سازها (dispersant).

۱-۴-۱- زاویه تماس و ترشوندگی

مهمترین عامل در فلوتاسیون، سطح تماس ایجاد شده بین جسم جامد و حباب هوا در درون آب است.

میزان چسبندگی حبابهای هوا به سطح دانه‌های جامد، توسط میزان ترشوندگی دانه توسط آب (هیدروفوبیسیته سطح: surface hydrophobicity) بیان می‌شود.

پایداری این چسبندگی نیز به وسیله زاویه تماس ایجاد شده بین سه فاز جامد، مایع و گاز اندازه‌گیری می‌شود.

الف- زاویه تماس: شکل ۱-۵، زاویه تماس بین حباب هوا و ذره را در یک محیط مایع نشان می‌دهد. تعادل سه فاز جامد، مایع و گاز را می‌توان توسط انرژی فصل مشترک (J/m^2) آنها بیان کرد:

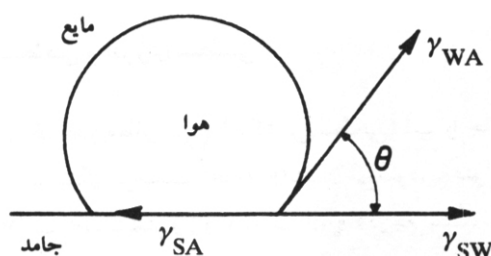
$$\gamma_{SA} = \gamma_{SW} + \gamma_{WA} \cos \theta$$

γ_{SA} : انرژی فصل مشترک جامد - هوا

γ_{SW} : انرژی فصل مشترک جامد - آب

γ_{WA} : انرژی فصل مشترک آب - هوا

θ : زاویه تماس



شکل ۱-۵- زاویه تماس بین حباب هوا و جسم جامد در محیط مایع (آب)

نیروی لازم برای جدا کردن هوا از ذره را نیروی چسبندگی (W_{SA}) می‌نامند:

$$W_{SA} = \gamma_{WA} + \gamma_{SW} - \gamma_{SA}$$

با ادغام دو رابطه فوق خواهیم داشت:

$$W_{SA} = \gamma_{WA} (1 - \cos \theta)$$

ملاحظه می‌شود که هر چقدر زاویه θ بزرگتر باشد، سطح جامد خاصیت آبرانی بیشتری دارد.

در شکل ۱-۶، تغییرات شکل قطره آب نسبت به زاویه تماس نشان داده شده است.

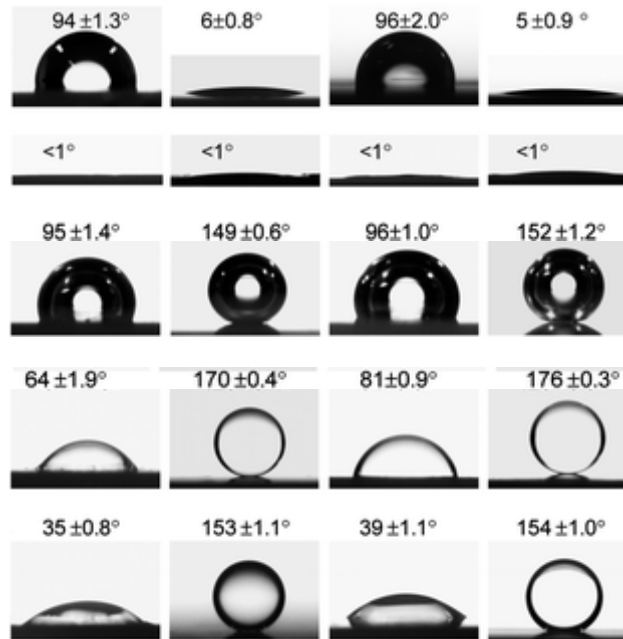
ب- ترشوندگی: کار ناشی از چسبندگی آب به جامد (W_A) برابر است با:

$$W_A = W_I + W_H + W_D$$

W_I : انرژی یونیزاسیون یا انرژی الکتریکی سطح تماس (سطح جامد)

W_H : انرژی پیوند هیدروژنی ناشی از واکنش دو قطبی مولکول آب با سطح جامد

W_D : انرژی تفرق حاصل از تأثیر متقابل آب با دو قطبی القایی در سطح جامد



۱-۶- تغییرات شکل قطره آب برای زوایای تماس مختلف

مقدار W_A را می‌توان با استفاده از معادله Young-Dupree نیز محاسبه نمود:

$$W_A = \gamma (1 + \cos \theta)$$

برای آنکه اتصال حباب به سطح جامد مؤثر باشد باید:

$$W_A < W_C$$

که W_C کار لازم برای جابجا کردن لایه آبی است که به سطح جامد چسبیده است (Work of Cohesion). این کار برابر است با:

$$W_C = 2\gamma$$

در سیلیکاتها و اکسیدها به دلیل حضور اکسیژن، انرژی یونیزاسیون و پیوند هیدروژنی بسیار بیشتر از انرژی تفرق است و لذا این مواد آبدوست هستند. سولفیدها به دلیل عدم تشکیل

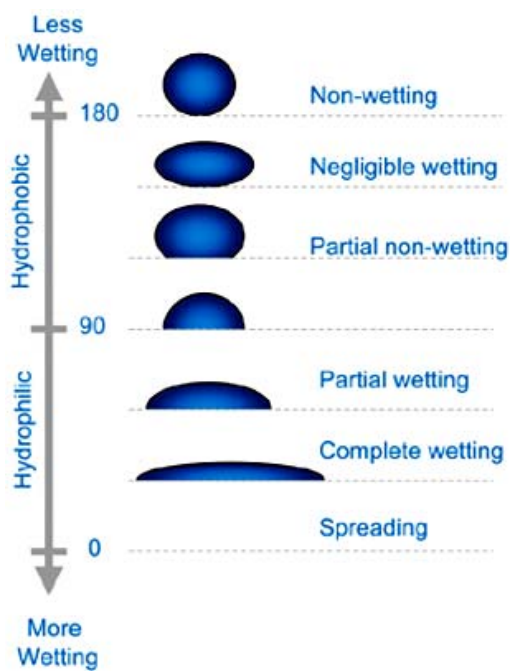
پیوند هیدروژنی با آب و انرژی کمتر یونیزاسیون، تمایل کمتری به آب نشان می‌دهند.

در شکل ۱-۷، رابطه میزان ترشوندگی با زاویه تماس نشان داده شده است.

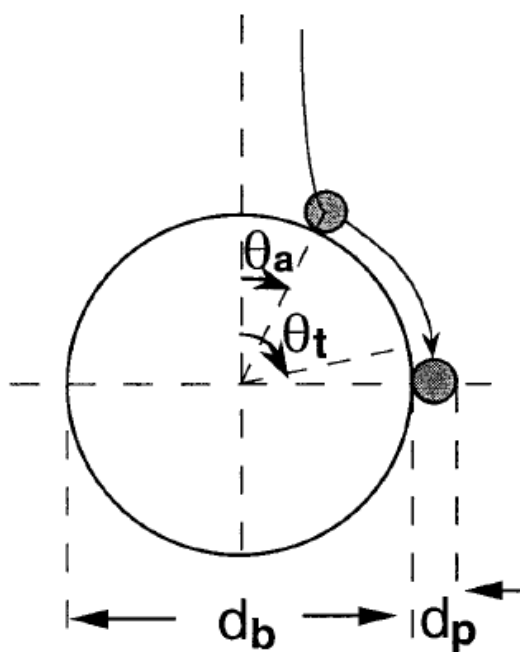
۱-۴-۲- مراحل اتصال ذره و حباب

یک اتصال موفق میان حباب و ذره (bubble/particle interaction or capture) شامل سه مرحله است:

- برخورد ذره با حباب (Collision or Adhesion): که به ابعاد ذره و حباب و فاصله و جهت مسیر ذره نسبت به حباب بستگی دارد (شکل ۸-۱).



شکل ۸-۱-۷- رابطه میزان ترشوندگی با زاویه تماس (برای قطره آب)



شکل ۸-۱-۸- نمایش شماتیک حرکت یک ذره حول یک حباب

محاسبه کارایی (احتمال) برخورد (E_c) با استفاده از نیروهای درگیر:

$$E_c = E_{ic} + E_g + \left(\frac{1 - E_{ic}}{1 + (d_p / d_b)^2} \right) \cdot E_{in}$$

E_{ic} اثر مداخله گر

E_g اثر گرانش

E_{in} اثرات درونی

d_p قطر ذره

d_b قطر حباب

محاسبه کارایی برخورد با استفاده از زاویه حداکثر برخورد (θ_t):

$$E_c = E_o \sin^2 \theta_t \times \exp \left[\frac{4E_o \cos \theta_t \left(\ln \frac{3}{E_o} - 1.8 \right) - \frac{2((2/3) + \cos^3 \theta_t / 3) = \cos \theta_t}{\beta \sin^2 \theta_t}}{3\beta} \right]$$

$$E_o = 3 \frac{d_p}{d_b} \quad \text{(معادله Sutherland)}$$

$$\sin^2 \theta_t = 2\beta \left[(1 + \beta^2)^{1/2} - \beta \right] \quad \text{(معادله Dukhin)}$$

$$\beta = 4d_p \rho_p / 3Kd_b (\rho_p - \rho_f)$$

β عدد بی بعد

ρ دانسیته ذره (p) و سیال (f)

K عدد Stokes، که بیانگر نسبت نیروهای اینرسی ذره به مقاومت ویسکوز سیال است.

مدت زمانی را که ذره بر روی سطح حباب می‌لغزد، زمان لغزش (Sliding time) می‌نامند. این

زمان از زاویه برخورد (θ) شروع و در زاویه ۹۰ درجه به اتمام می‌رسد.

$$t_{sl} = - \frac{d_p + d_b}{2(v_p + v_b) + v_b \left(\frac{d_b}{d_p + d_b} \right)^3} \ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)$$

که v_p و v_b به ترتیب سرعت سقوط ذره و صعود حباب می‌باشند.

• اتصال ذره به حباب (Attachment): بیش از هر چیز به ابعاد و خواص سطحی ذره بستگی

دارد. شامل سه مرحله می‌شود:

- نازک شدن لایه نازک سیال بین ذره و حباب تا مقدار بحرانی گسیختگی
 - گسیختگی (پارگی) لایه نازک و تشکیل پیوند سه فازی (TPC)
 - افزایش خط TPC از مقدار بحرانی تا تشکیل اتصالی پایدار میان ذره و حباب
- کارایی اتصال برابر است با:

$$E_a = \sin^2 \theta_a / \sin^2 \theta_t$$

که θ_a زاویه برخورد اولیه ذره با حباب است.

زمان مورد نیاز جهت گسیختگی لایه نازک، زمان اتصال (Induction time) برابر است با:

$$t_{ind} = Ad_p^B$$

که A و B مقادیر ثابت هستند.

- پایداری اتصال (Stability): اتصال پایداری موجب باردار شدن حباب و در نتیجه، انتقال ذرات به کف می‌شود. کارایی اتصال، برآیندی از نیروهای ناشی از حرکت رو به بالای مجموعه حباب و ذره (bubble/particle aggregate) و نیروهای رو به پایین است.

کارایی اتصال موفق برابر است با برآیند سه مرحله فوق:

$$E_{cap} = E_c E_a E_s$$

نیروهای مؤثر بر کارایی اتصال ذره و حباب عبارتند از (شکل ۹-۱):

- نیروی گرانش (Gravitational force): $G = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g$
- نیروی شناوری (Buoyant force): $B = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_f g$
- نیروی گریز از مرکز (Centrifugal force): $C = \frac{\pi}{3} d_p^3 (\rho_p - \rho_f) \frac{v_a^2}{d_b + d_p}$
- نیروی مقاومت سیال (Drag force): $F_d = 3\pi(1 + k_s)\mu d_p v_a$
- نیروی موئینگی (Capillary force): $F_\gamma = \pi d_p \gamma \sin \omega \sin(\lambda - \omega)$

در معادلات فوق،

v_a سرعت لغزش

k_s ضریب عددی که بیانگر تأثیرات بین سطحی است

μ ویسکوزیته دینامیکی مایع

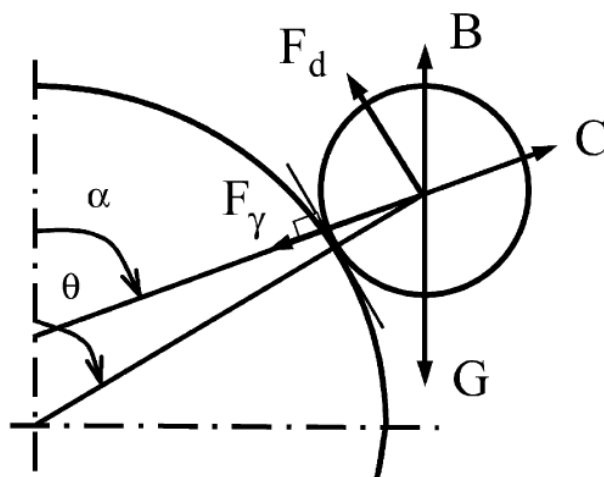
γ کشش سطحی مایع

λ زاویه تماس ذره

ω موقعیت زاویه TPCL در ذره است که به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$(G - B) \cos \alpha \Big|_{\alpha=180^\circ} + F_\gamma \Big|_{\alpha=180^\circ} = 0$$

کلیه این نیروها مستقیماً بر سرعت حرکت (لغزش) ذره بر سطح حباب و در نتیجه زمان لغزش مؤثرند.



شکل ۱-۹- تصویر شماتیک از نیروهای وارده بر ذره در مسیر لغزش بر روی سطح حباب

۱-۵- بار سطحی

میزان کار لازم برای جابجا کردن لایه آب از سطح جامد توسط حباب و برقراری اتصال حباب و ذره، به مقدار بار سطحی ذره بستگی دارد. بار سطحی در اثر سه مکانیزم ایجاد می‌شود:

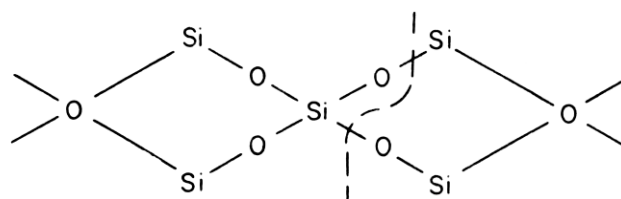
۱-۵-۱- جذب شیمیایی

فعل و انفعالات شیمیایی ویژه‌ای که بین سطوح ذرات و آب صورت می‌گیرد جذب شیمیایی نام دارد.

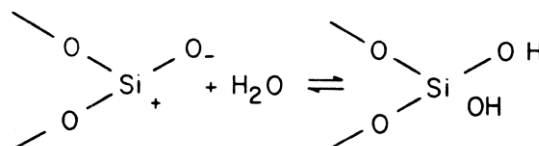
در اثر این فعل و انفعالات، ترکیبات مختلفی در سطح ذرات تشکیل می‌شود.

یکی از رایج‌ترین مکانیزم‌های ایجاد بار سطحی را می‌توان در اکسیدها، سیلیکات‌ها و نمک‌های کم محلول مشاهده کرد که با تشکیل و سپس تجزیه سطحی گروه اسیدی همراه است (مثل کوارتز، شکل ۱-۱۰).

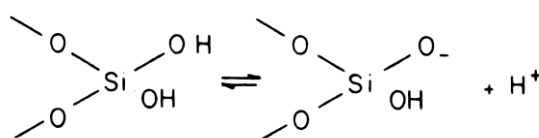
میزان و نوع بار سطحی در این مکانیزم به فعالیت یون هیدروژن بستگی دارد.



سطح شکست



جذب سطحی یون هیدروژن و یون هیدروکسیل



تفکیک (تجزیه) شدن یون هیدروژن از گروه سیلانول

شکل ۱-۱-۱۰- نمایش شماتیک توسعه و رشد بار سطحی در سطح کوارتز

۱-۵-۲- انحلال ترجیحی یونهای سطحی (هیدراتاسیون سطحی)

در غیاب واکنشهای سطحی، بار سطحی در اثر تجزیه ترجیحی یونهای سطحی ذرات به وجود می‌آید.

این مکانیزم برای کانیهای متشکل از یونهای یک ظرفیتی که در آنها توزیع کاتیونها و آنیونها در سطح کلیواژ یکسان باشد صادق است (مثل AgI).

علامت بار سطحی نیز توسط انرژی آزاد هیدراتاسیون یونهای تشکیل دهنده شبکه کانی تعیین می‌شود.

۱-۵-۳- جانشینی شبکه‌ای

جانشینی شبکه‌ای سبب انحراف جزئی در استوکیومتری مواد می‌شود. این انحرافات موجب تشکیل بارهای سطحی می‌شود (مثل رسها).

۱-۶- پدیده جذب (Adsorption)

خواص سطحی جامدات و مایعات مستقل از خواص داخلی آنها است. مولکولهایی که در داخل واقع شده‌اند در تمام جهات و به طور یکسان توسط مولکولهای اطراف خود جذب می‌شوند ولی در مولکولها و اتمهای سطحی، نیروی جاذبه فقط از یک طرف اعمال می‌شود. پس مولکولها و یا اتمهای سطحی قادرند مولکولها و اتمهای خارجی را به طرف خود جذب کنند. جذب مواد در سطح کانیها ناشی از تأثیر یک یا چند نیروی مختلف از قبیل الکترواستاتیکی، پیوند کووالانسی، پیوند هیدروژنی، نیروهای واندروالسی، حلالیت سطح و تبادل یونی است. اگر پدیده جذب ناشی از نیروهای الکترواستاتیکی و یا نیروهای واندروالسی باشد آن را جذب فیزیکی و در غیر این صورت آن را جذب شیمیایی می‌نامند.

۱-۷- دولایه الکتریکی

ضمن توسعه و گسترش بار سطحی، در سطح ذره دو لایه‌ای الکتریکی پدید می‌آید که یک لایه آن متصل به ذره می‌باشد و لایه دیگر آن در محلول قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۱-۱۱، لایه اول (لایه استرن) در برگیرنده یونهای با بار مخالف سطح و لایه دوم (لایه پراکنده) شامل یونهای با بار مخالف لایه استرن است.

جذب کلکتورها بر سطح ذرات مثالی از پدیده دولایه الکتریکی است (شکل ۱-۱۲).

افت پتانسیل از سطح ذره به سمت عمق محلول (پالپ) از رابطه‌ی نمای زیر پیروی می‌کند:

$$\Psi = \Psi_{\delta} \cdot e^{-Kx}$$

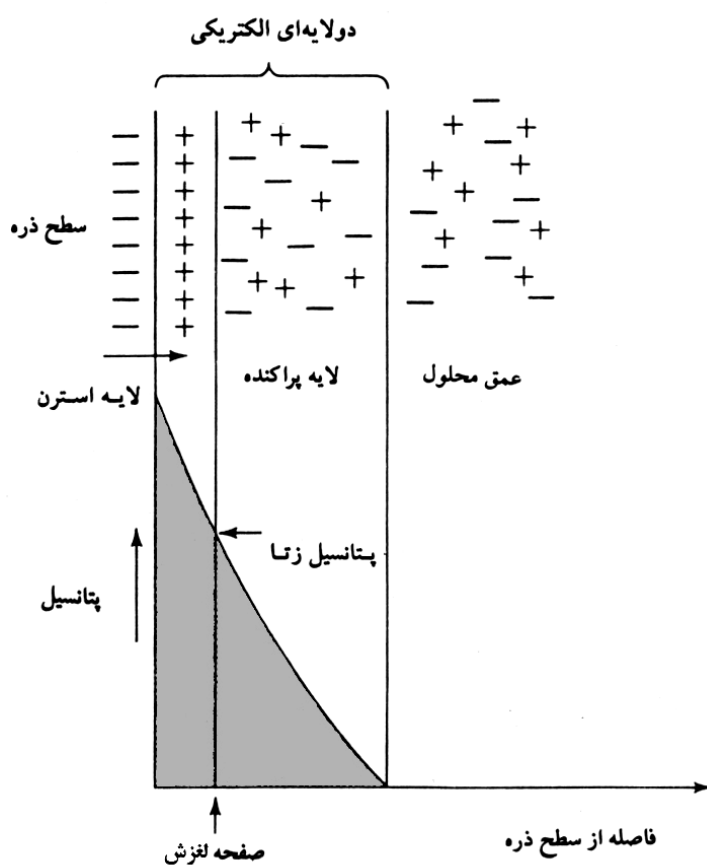
Ψ : پتانسیل الکتریکی از سطح کانی (در فاصله x)

Ψ_{δ} : پتانسیل الکتریکی لایه استرن

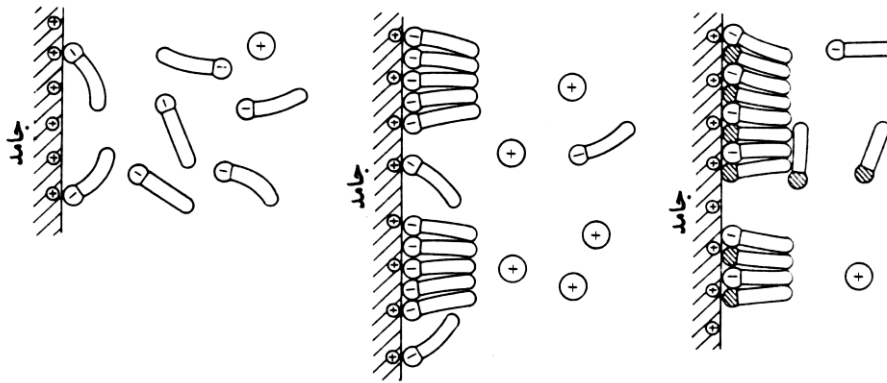
K : طول دبابی (Debye Length) و برابر است با:

$$K = \sqrt{\frac{\delta \cdot \pi \cdot e^2 \cdot \sum_1^i n_i z_i^2}{D \cdot k \cdot T}}$$

- δ : ضخامت لایه استرن
- e : بار الکتریکی
- k : ثابت بولتزمن
- T : درجه حرارت
- D : ثابت دی الکتریک آب
- n_i : تعداد یونهای i در واحد حجم
- Z_i : ظرفیت یون i



شکل ۱-۱۱- نمودار شماتیک دو لایه الکتریکی



کلکتور آنیونی \ominus مولکول خنثی \circ یون تعیین کننده پتانسیل \oplus یون مخالف هیدراته \oplus

شکل ۱-۱۲- تشکیل دو لایه الکتریکی در حضور مواد فعال کننده سطحی (کلکتورها)

۱-۷-۱- پتانسیل زتا

بین لایه استرن و لایه های آب که در فواصل دورتر از سطح ذره قرار دارند، یک صفحه لغزش وجود دارد که فاصله آن با سطح ذره به طور دقیق شناخته نشده است. اختلاف پتانسیل بین این صفحه و لایه های درونی محلول، پتانسیل کلی دو لایه الکتریکی (Ψ_0) و اختلاف پتانسیل بین صفحه و سطح جامد، پتانسیل زتا (Zeta Potential) نامیده می شود (شکل ۱-۱۱).

Ψ_0 برابر است با:

$$\Psi_0 = \frac{RT}{nf} \ln \frac{a^+}{a^{0+}} = -\frac{RT}{nf} \ln \frac{a^-}{a^{0-}}$$

R : ثابت گازها ($\text{cal.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)

T : دمای مطلق ($^{\circ}\text{K}$)

n : ظرفیت (eq.mol^{-1})

f : ثابت فارادی (cal.V^{-1})

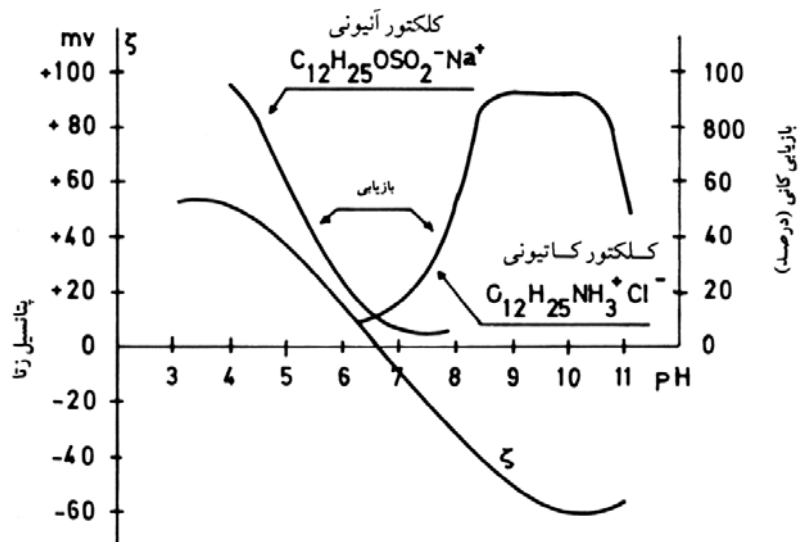
a^+, a^- : فعالیت یونهای تعیین کننده پتانسیل در محلول

a^{0+}, a^{0-} : فعالیت یونهای تعیین کننده پتانسیل در در نقطه بار صفر (ZPC)

۱-۷-۲- نقطه بار صفر

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^- به وجود 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 می‌آید. در یک pH مشخص، بار سطحی ذرات به صفر می‌رسد که به آن نقطه بار صفر (Zero Point of Charge : ZPC) می‌گویند (شکل ۱-۱۳).



شکل ۱-۱۳ - تغییرات پتانسیل زتا نسبت به pH

فصل دوم

شیمه محلول و مواد شیمیایی فلوتاسیون

۱-۲- مقدمه

کارایی عملیات فلوتاسیون به نرخ حمل ذرات توسط حبابها بستگی دارد. آیا اینکه اتصال حبابها و ذرات رخ می‌دهد یا خیر بر اساس توانایی ترشوندگی سطح ذرات به وسیله آب تعیین می‌شود. اگر ذره تمایل زیادی به تر شدن نداشته باشد آن را آبران یا آبگریز (Hydrophobic particle) می‌نامند. چنین ذره‌ای به سطح حبابها متصل خواهد شد. پایداری این اتصال نیز با استفاده از زاویه تماس بین سه فاز جامد، مایع و گاز بررسی می‌شود. چنانچه ذره تمایل به تر شدن داشته باشد آن را آبدوست یا آب‌پذیر (Hydrophilic particle) می‌نامند. چنین ذراتی تمایل زیادی برای اتصال به حبابهای هوا ندارند.

۲-۲- تقسیم‌بندی کانیها

از نظر خواص سطحی، کانیها را به دو گروه قطبی و غیرقطبی تقسیم می‌کنند. کانیهای غیرقطبی در سطح خود پیوندهای مولکولی ضعیفی دارند. سطح بعضی از این کانیها از مولکولهای کووالانسی (توسط نیروی واندروالس) تشکیل شده است و سطح غیرقطبی آنها به سادگی آب جذب نمی‌کند و در نتیجه این مواد آبرانند. کانیهای قطبی در سطح خود پیوندهای مولکولی قوی دارند و نوع پیوند در این نوع کانیها الکترووالانس است و از نظر جذب حباب هوا ضعیف‌اند. سطح قطبی این کانیها به شدت با مولکول آب ترکیب می‌شوند و این دسته از کانیها به طور طبیعی آبدوست می‌باشند.

کانیها به لحاظ آبدوست یا آبران بودن به ۶ گروه تقسیم می‌شوند. در جدول ۱-۲، درجه قطبی بودن در مورد کانیهای گروه دوم کم و به ترتیب در گروه‌های بعدی افزایش می‌یابد. کانیهای گروه اول کاملاً غیرقطبی هستند. بجز طلا، نقره، مس و تمامی سولفیدهای گروه دو که به علت پیوند کووالانسی درجه قطبی ضعیفی دارند، بقیه کربناتها و سولفاتهای این گروه به علت پیوند یونی، کمابیش درجه قطبی قوی دارند. قطبی بودن کانیها در سولفیدها کم است و به ترتیب در سولفاتها، کربناتها، هالیتها، فسفاتها، اکسیدها، هیدروکسیدها، سیلیکاتها و کوارتز زیاد می‌شود.

کانیهای گروه ۱ نیز به طور طبیعی آبران هستند ($\theta = 60^\circ - 90^\circ$). علت اصلی این پدیده غیرقطبی بودن آنها می‌باشد. علت دوم آبران بودن این کانیها، عدم حضور پیوند هیدروژنی است. به عنوان مثال پیوند هیدروژنی آب با یونهای اکسیژن، دلیل اصلی ترشوندگی اکسیدها و سیلیکاتها است. یون سولفید به دلیل ابعاد بزرگش، با آب پیوند هیدروژنی تشکیل نمی‌دهد پس گوگرد و بسیاری از مواد دیگر نظیر مولیبدنیت و استینیت آبرانی طبیعی دارند. در تالک و پیروفیلیت، اتمهای داخلی لایه توسط پیوندهای یونی به یکدیگر متصل هستند در حالی که اتمهای اکسیژن در دو لایه مجاور با نیروهای ضعیف باقیمانده به یکدیگر متصل می‌شوند و لذا بار الکتریکی آنها ناچیز بوده و ساختار غیرقطبی از خود نشان می‌دهند.

جدول ۱-۲ - تقسیم‌بندی کانیها از نظر قطبی یا غیرقطبی بودن

جدول ۱-۲ - تقسیم‌بندی کانیها از نظر قطبی یا غیرقطبی بودن					
بسیار قطبی			غیرقطبی		
بسیار آبدوست			آبران طبیعی		
گروه ۶	گروه ۵	گروه ۴	گروه ۳	گروه ۲	گروه ۱
زیرکن	هماتیت	سروزیت	باریت	گالن	گرافیت
ویلیمیت	مگنتیت	مالاکیت	انهدریت	کولیت	الماس
همی‌مورفیت	گوتیت	آزوریت	ژیپس	بورنیت	زغال
بریل	کرومیت	ولفنیت	انگلزیت	کالکوسیت	گوگرد
گروه فلدسپات	ایلمنیت	فلورین		کوبالتیت	مولیبدنیت
سیلیمانیت	کروندوم	کلسیت		ارسنوپیریت	استینیت
گروه گارنت	لیمونیت	منیزیت		پیریت	پیروفیلیت
کوارتز	ولفرامیت	دولومیت		اسفالریت	تالک
	تانتالیت	آپاتیت		فلزات طلا نقره،	آپودریت
	روتیل	اسمیت‌زونیت		مس و پلاتین	
	کاسیتیریت	شٹلپت			

۲-۳- مواد شیمیایی مصرفی در فلوتاسیون مواد معدنی

در فرایند پرعیارسازی مواد معدنی، پس از مطالعات مقدماتی و تعیین حد جدایش برای فلوتاسیون، مرحله آماده‌سازی سطح کانیها از نقطه نظر فلوتاسیون باید به گونه‌ای انجام گیرد تا اتصال کانیها به صورت انتخابی به حباب هوا فراهم آید؛ این امر مستلزم استفاده از مواد شیمیایی قبل از فلوتاسیون است. این مواد عبارتند از تنظیم‌کننده‌های pH، کلکتورها، بازداشت‌کننده‌ها، فعال‌کننده‌ها، متفرق‌کننده‌ها و کفسازها. بسته به نوع مواد شیمیایی، نوع ماده معدنی و پارامترهایی دیگر، این مواد در مراحل آسیا کردن و طبقه‌بندی و یا در مرحله مستقلی و در تانکهای آماده‌سازی اضافه می‌شوند.

۲-۴- تنظیم‌کننده‌های pH (pH-regulators)

برای فلوتاسیون هر کانی، pH بهینه‌ای وجود دارد که تحت آن شرایط، بازیابی فلوتاسیون حداکثر می‌شود. بعلاوه، مقدار pH بر عملکرد مواد شیمیایی تأثیر بسزایی دارد. یونهای هیدروکسیل و هیدروژن، دولایه الکتریکی و پتانسیل زتا را تغییر می‌دهند و در نتیجه بر هیدراته شدن سطح کانی و قابلیت شناوری آن تأثیر می‌گذارند. pH مناسب به نوع کانی، نوع و غلظت مواد شیمیایی و دمای محیط بستگی دارد. موادی که برای تنظیم pH مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- جهت افزایش pH: آهک، کربنات سدیم، هیدروکسید سدیم، هیدروکسید آمونیوم
- جهت کاهش pH: اسید سولفوریک، اسید سولفور و اسید هیدروکلریدپریک

۲-۵- کلکتورها (Collectors)

قابلیت آبرانی کانیها را می‌توان توسط مواد آلی محلول در آب افزایش داد و آنها را شناور کرد؛ این مواد آلی را کلکتور می‌نامند.

کلکتورها از یک رأس قطبی و یک رأس غیرقطبی (زنجر هیدروکربن) تشکیل شده‌اند (شکل ۲-۱).

گروه قطبی از کاتیونها و آنیونها تشکیل شده است که یک یون، فعال و دیگری یون غیرفعال می‌باشد.

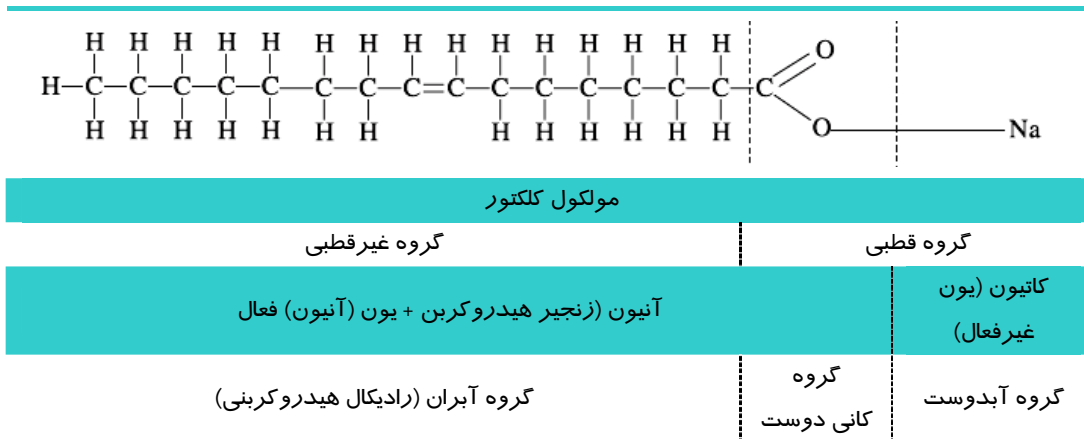
یون غیرفعال طی انحلال کلکتور در آب، از رأس قطبی جدا و وارد محلول می‌شود.

گروه غیرقطبی به یون فعال متصل است و یون فعال به عنوان پل ارتباطی بین زنجیر هیدروکربن و سطح کانی عمل می‌کند؛ بنابراین، قدرت انتخابی بودن کلکتور وابسته به یون فعال و خاصیت آبرانی آن متناسب با طول زنجیر هیدروکربن است.

یون فعال رأس قطبی (یون کانی‌دوست، Solidophilic group) در سطح کانی جذب شده و گروه غیرقطبی به سمت فاز مایع جهت‌گیری می‌کند و چون با آب واکنش نمی‌دهد باعث آبران شدن سطح کانی (Hydrophobic) می‌شود.

نکته ۱: طول زنجیر هیدروکربنی کلکتورها معمولاً بین ۲ تا ۵ اتم کربن است. با افزایش طول زنجیر قدرت انتخابیت و حلالیت کلکتور در آب کم می‌شود.

نکته ۲: کلکتورهای دارای زنجیر هیدروکربنی شاخه‌ای حلالیت کمتری نسبت به انواع مستقیم دارند.



شکل ۱-۲ - ساختار عمومی کلکتورها (نمونه کلکتور آنیونی اولئات سدیم)

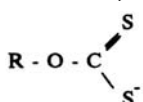
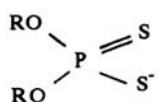
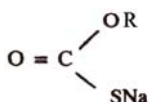
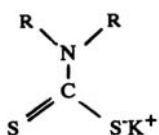
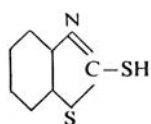
۲-۵-۱- طبقه‌بندی کلکتورها

کلکتورها از نظر یونیزاسیون در آب و نوع یونی که سبب آبران شدن سطح کانی می‌شود به انواع یونیزه شونده و غیر یونیزه شونده تقسیم‌بندی می‌شوند.

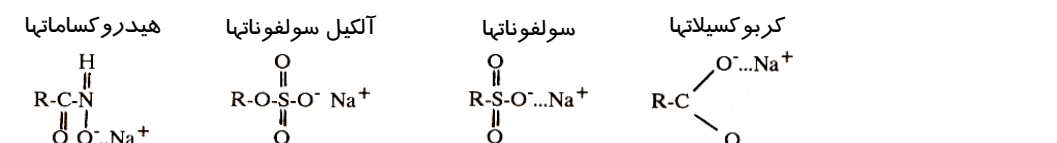
نکته ۱: با توجه به عملکرد متفاوت کلکتورها، معمولاً از مخلوطی از آنها استفاده می‌شود.

نکته ۲: معمولاً در مراحل اولیه (رافر) از کلکتورهای با درجه انتخابیت بیشتر و در مراحل بعدی (رمق‌گیری) از کلکتورهای با قدرت بیشتر و درجه انتخابیت کمتر استفاده می‌شود.

جدول ۲-۲- انواع کلکتورها و مشخصات آنها

گروه کلکتور	انواع	توضیحات
غیریونیک	هیدروکربنهای غیرقطبی و اشباع شده (C_nH_{2n+2}) و یا حلقوی ($C_{12}H_{2n}$) مانند نفت، گازوئیل، کروزین، روغنهای کراکینک، قطران، روغن چوب، بنزین	جهت فلوتاسیون کانیهای به طور طبیعی آبران مانند زغال و نیز کانیهای مولیبدن و بیسموت به کار می‌روند.
یونیک	کلکتورهای کاتیونیک (آمینها)	این کلکتورها مشتقات آمونیاک هستند. در محدوده pH=۹-۱۱ خاصیت کف‌سازی دارند. نسبت به آب سخت حساس نیستند. جهت فلوتاسیون سیلیکاتها، فلدسپاتها و همچنین هماتیت، کاسیتیریت، کلسیت و غیره به کار می‌روند. برخی از انواع آنها در فلوتاسیون سولفیدها نیز به کار می‌روند.
	کلکتورهای آنیونی (تیولها)	
	سولفیدریلها	گزناتها جهت فلوتاسیون سولفیدها و بعضی از کربناتها به کار می‌روند. 
	دی‌تیوفسفاتها	این کلکتورها بر خلاف گزنات بر روی پیریت اثری ندارند. معمولاً به همراه گزناتها جهت فلوتاسیون سولفیدهای مس و سرب به کار می‌روند. 
	تیو کربناتها	جهت فلوتاسیون سولفیدها به کار می‌روند. 
	تیو کاربامیتها	جهت فلوتاسیون سولفیدها به کار می‌روند. 
	مرکاپتاتها	جهت فلوتاسیون نیکل، کبالت و سرهای اکسیده به کار می‌روند. در pH=۵، پیریت را نیز شناور می‌کنند. 
	تیو کاربانیلیدها	جهت فلوتاسیون گالن به کار می‌روند. بر روی پیریت و بلند اثری ندارند.

اکسی‌هیدریلها در $pH=8-9$ خاصیت کفسازی نیز دارند. جهت فلوتاسیون کانیهای فلزات قلیایی خاکی و در فلوتاسیون (اکسیدریلها) مرحله‌ای اکسیدها و سولفیدها به همراه گزنتاتها استفاده می‌شوند. انواع آنها عبارت است از:

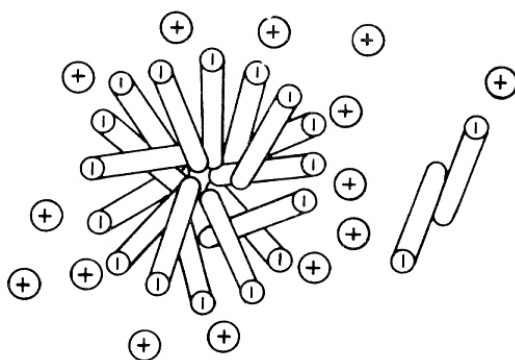


۲-۵-۲- پدیده تشکیل میسل و همی میسل

میسل‌ها مجموعه یونهای کلکتوری هستند که توسط نیروی واندروالسی بین زنجیر هیدروکربن کلکتورها به وجود می‌آیند (شکل ۲-۲).

میسل‌ها باعث تجمع زنجیر هیدروکربن شده و از محلول خارج می‌شوند. به علت نیروی دافعه الکترواستاتیکی که بین رأسهای قطبی کلکتور وجود دارد، این نوع تجمع جز در غلظتهایی که از حد معینی بیشتر باشد نمی‌تواند تشکیل شود. به این غلظت معین، غلظت میسلی بحرانی (CMC) گفته می‌شود.

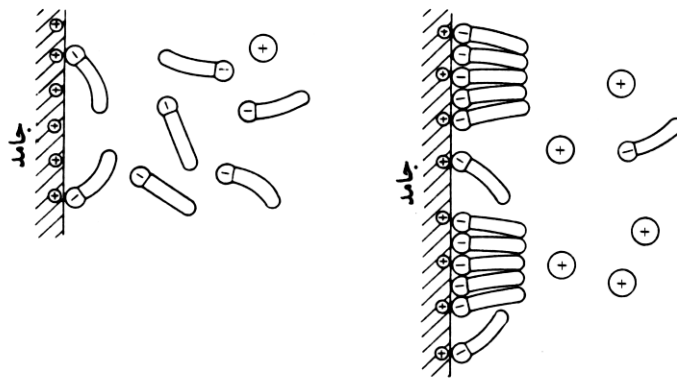
نکته: از CMC بازیابی به دلیل کاهش عملکرد کلکتورها، کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۲- پدیده تشکیل میسل در محلول

بسته به غلظت کلکتور و طول زنجیر هیدروکربن، حضور کلکتور به عنوان یونهای انفرادی و یا دسته‌جمعی در سطح کانی ظاهر می‌شود. این گروه از یونها را همی میسل یا شبه میسل می‌گویند.

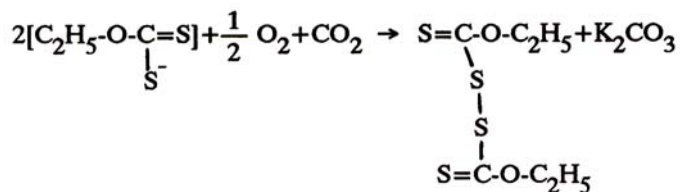
مطابق با شکل ۲-۳، در غلظتهای کم، کلکتور به صورت یونهای مجزا و به عنوان یون مخالف بار الکتریکی سطح در فصل مشترک کانی و آب تحت نیروی الکترواستاتیکی جذب می‌شوند. با افزایش غلظت کلکتور، دانسیته جذب افزایش یافته و بین زنجیر هیدروکربن یونهای جذب شده در سطح کانی واکنش رخ می‌دهد و در اثر یک نیروی واندروالسی به یکدیگر متصل می‌شوند. پدیده همی‌میسل، میزان آبرانی مواد را افزایش می‌دهد.



کلکتور آنیونی \ominus یون تعیین کننده پتانسیل \oplus یون مخالف هیدراته \oplus

شکل ۲-۳- تشکیل همی‌میسل در سطح کانیها

یکی از معروفترین و متداولترین نوع گزنتاتها، اتیل گزنتات سدیم است. این کلکتور به کمک اکسیژن اکسید شده و منجر به بوی تند و غلیظ شدن رنگ آن می‌شود. این پدیده در اثر تشکیل توده‌ای روغنی به نام دی‌گزنتوژن است که از سیستم خارج شده و در سطح پالپ شناور می‌شود:



۲-۵-۳- مکانیزم‌های جذب کلکتورها

با توجه به ویژگیهای کلکتورها، چهار مکانیزم عمده را می‌توان برای کلکتورها ارائه نمود:

- **جذب فیزیکی:** این مکانیزم مربوط به کلکتورهای غیریونیک است. این کلکتورها برای کانیهای غیرقطبی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ بنابراین، طی این مکانیزم، کلکتور توسط

پیوند واندروالس در سطح کانی به صورت فیزیکی جذب می‌شود (مثل جذب گازوئیل بر سطح ذرات زغال).

- **جذب الکترواستاتیکی:** که مکانیزم اصلی برای جذب کلکتورها (معمولاً کاتیونی) بر سطح کانیهای اکسیدی است. اساس این نوع جذب، برقراری پیوند میان بارهای غیر همنام در گروه قطبی کلکتور و سطح کانی است. شرایط مناسب برای این نوع جذب طی پدیده‌های اکسیداسیون و احیا در سطح کانی رخ می‌دهد. برای فعالسازی کانیهای سولفوری معمولاً به اکسیداسیون سطحی نیاز است که اکسیژن موجود در سیستم عامل اصلی فرایند می‌باشد.

نکته: معمولاً در فرایند اکسیداسیون کانیهای سولفوری، در سطح کانی گوگرد عنصری تشکیل می‌شود. گوگرد به خودی خود آبران است و بنابراین، باعث آبران شدن سطح کانی و در نتیجه شناور شدن کانی بدون نیاز به کلکتور می‌شود. به این فرایند، فلوتاسیون بدون کلکتور (Collectorless flotation) می‌گویند.

- **جذب شیمیایی:** این نوع جذب، مکانیزم اصلی جذب کلکتور بر سطح کانیهای سولفیدی گالن، کالکوسیت و اسفالریت است. جذب شیمیایی معمولاً به دنبال اکسیداسیون اولیه سطح کانی در حضور اکسیژن محلول در آب و تشکیل سولفات سطحی و در ادامه جایگزینی سولفات فلزی با کربنات آن صورت می‌گیرد. کلکتور بسته به بزرگی فعالیت ترگیش با فلز، جایگزین عاملهای سطحی (سولفات، کربنات و یا هیدروکسید) شده و به دلیل پایداری بیشتر در سطح کانی رسوب و آن را آبران می‌کند.

نکته ۱: کلکتور گزنتات برای کانیهای مورد استفاده قرار می‌گیرد که گزنتات فلزی سطح کانی، حلالیت کمی در آب داشته باشد (مانند گزنتات مس، سرب، نقره و جیوه). بنابراین، کانیهای فلزات خاکی (کلسیم، باریم، منیزیم) و نیز اکسیدها، سیلیکاتها و آلومینوسیلیکاتها را نمی‌توان با گزنتات آبران نمود.

نکته ۲: حلالیت گزنتات فلزاتی نظیر آهن و روی بالاست و بنابراین کانیهای این فلزات نیاز به فعالسازی دارند (مانند فعالسازی اسفالریت ZnS ، با سولفات مس $CuSO_4$).

نکته ۳: برای آبران نمودن کانیهای اکسید شده (مانند مالاکیت $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ ، سروزیت $PbCO_3$ و آنگلریت $PbSO_4$) و کانیهای طبیعی (مانند طلا، نقره و مس) توسط گزنتات به غلظت بالای کلکتور نیاز است.

- **جذب الکتروشیمیایی:** این نوع جذب، مکانیزم غالب کانیهای سولفیدی پیریت، آرسنوپیریت و پیروتیت است. اساس این نوع جذب، تشکیل پتانسیل سطحی کانیهای سولفیدی (که هادی الکتریسیته هستند) می‌باشد؛ این پتانسیل، پتانسیل آزاد یا پتانسیل ماند (Rest potential) نامیده می‌شود. در این شرایط، دو واکنش آندی و کاتدی در سطح کانی رخ می‌دهد که اولی موجب تشکیل مولکول خنثی (غیریونی) دوتایی کلکتور (Dio-) و دومی احیاء اکسیژن جذب شده در سطح کانی به یون هیدروکسید می‌شود. مجموع این دو واکنش سبب جذب مولکول خنثی دوتایی کلکتور در سطح کانی و آبران شدن آن می‌شود (مانند تشکیل دایوگزنوتورن (Dio-xanthogen) در سطح پیریت).
- نکته:** مکانیزم جذب الکتروشیمیایی زمانی رخ می‌دهد که پتانسیل آزاد برای سیستم محلول کانی از پتانسیل برگشت‌پذیر اکسیداسیون کلکتور بیشتر باشد.
- نکته:** بسته به شرایط، جذب کلکتور در سطح کانیهای سولفوری ممکن است به صورت همزمان از هر دو مکانیزم جذب شیمیایی و الکتروشیمیایی پیروی کند (به عنوان مثال، جذب کلکتور فلزی و دایوگزنوتورن به صورت همزمان در سطح کانی و آبران شدن آن به صورت همزمان توسط هر دو گونه).

۲-۶- فعال‌کننده‌ها (Activators)

اگر یک کانی به هر دلیلی توسط کلکتوری آبران نشود و سپس یک ماده شیمیایی به منظور آماده‌سازی کانی به محیط اضافه شود تا توسط همان کلکتور آبران گردد، در این صورت گفته می‌شود که سطح کانی فعال شده است. بنابراین، فعال‌کننده‌ها موادی هستند که خاصیت شناور شدن بعضی از مواد معدنی را تقویت می‌کنند.

فعال‌کننده‌ها از یک یون فعال و یک یون غیرفعال تشکیل شده‌اند. یون فعال طی یک واکنش شیمیایی و جانشینی شبکه‌ای در سطح کانی، ترکیب سطح را تغییر می‌دهند.

مصرف فعال‌کننده‌ها باید به اندازه‌ای باشد که فقط لایه‌ای در سطح کانی تشکیل دهد و شرایط را برای انجام واکنش فراهم سازد، زیرا مصرف بیش از حد این مواد باعث بازداشت بعضی از کانیها می‌شود.

انواع فعال‌کننده‌ها در **جدول ۲-۲** معرفی شده‌اند.

جدول ۲-۲- انواع فعال‌کننده‌ها و مصارف آنها

فعال‌کننده	محدوده کاربرد
یونهای مس و سرب	جهت فعال کردن سولفیدها به ویژه اسفالریت
سولفور سدیم	جهت سولفیدی کردن کانیهای کربناته نظیر سروریت و مالاکیت
نیترات و استات سرب	جهت فعال کردن اسیبیت، نمک طعام و نیز فعال کردن سیلیکاتها و کربناتها با کلکتورهای چرب
یون فلورید	جهت فعال کردن بعضی از سیلیکاتها نظیر فلدسپات و بریل

۷-۲- بازداشت‌کننده‌ها (Depressants)

بازداشت‌کننده‌ها (یا بازدارنده‌ها) مواد شیمیایی هستند که اضافه کردن آنها به محیط فلوتاسیون باعث آبدوست شدن کانیهای دیگر و لذا مانع فلوتاسیون آنها می‌گردد و در عین حال تأثیر نامناسبی بر روی کانی مورد نظر (مورد شناور شدن) باقی نمی‌گذارند.

مدت شناور نشدن کانی ممکن است موقتی و یا دائمی باشد.

بازداشت‌کننده‌ها به دو گروه آلی و غیر آلی تقسیم می‌شوند. انواع غیر آلی در اثر واکنشهای شیمیایی، در سطح کانی جذب می‌شوند. بازدارنده‌های آلی نیز به صورت کلوئیدهایی هستند که به صورت فیزیکی (نیروهای الکترواستاتیکی و کولمبی) در سطح جذب می‌شوند. انواع بازدارنده‌ها در جدول ۲-۳ ارائه شده‌اند.

۷-۲-۱- نکاتی در مورد یون سیانور

تحقیقات نشان داده است که حلالیت گزنتهای فلزات مختلف در سیانور نسبت به نوع فلزی که در گزنتات وجود دارد تغییر می‌کند. از این نظر فلزات به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند:

- فلزاتی که گزنتات آنها در سیانور نامحلول‌اند مانند سرب، کالیم، بیسموت، آرسنیک و قلع. این فلزات نه ترکیب پیچیده سیانور ایجاد می‌کنند و نه ترکیب نامحلول ساده و در نتیجه کانیهای آنها در حضور سیانور به سهولت با گزنتاتها شناور می‌شوند.
- فلزاتی که حلالیت گزنتهای آنها با افزایش مقدار سیانور زیاد می‌شود مانند جیوه، پلاتین، نقره، کادمیم و مس. کانیهای این فلزات فقط وقتی بازداشت می‌شوند که مقدار سیانور در محیط خیلی زیاد باشد.

- فلزاتی که گزنتاتهای آنها به سهولت در سیانور حل می‌شود مانند آهن، طلا، نیکل، پلادیوم و روی. کانیهای این فلزات به سهولت توسط سیانور بازداشت می‌شوند و حتی اثر ناچیزی از یون آزاد سیانور برای این کار کافی است. حلالیت گزنتاتها به طول زنجیر هیدروکربن بستگی دارد و هر قدر طول زنجیر بلندتر باشد، سیانور دیرتر باعث حل شدن آن می‌گردد.

جدول ۲-۳- انواع بازداشت‌کننده‌ها و محدوده کاربرد آنها

محدوده کاربرد	بازداشت‌کننده‌ها غیرآلی
بازداشت کانیهای سولفیدی با عناصر Cd, Ag, Fe, Cu, Zn, Sb و Ni	یون CN^- (به شکل NaCN)
جهت بازداشت گالن	یون $(Cr_2O_7)^{2-}$ (به شکل دی کرومات پتاسیم $K_2Cr_2O_7$)
بازداشت سولفیدهای روی و آهن و همچنین مس طی فلوتاسیون مولیبدن	سولفید سدیم
بازداشت سولفیدهای روی، آهن و گالن	گاز SO_2
بازداشت اسفالریت و پیریت	سولفات روی
بازداشت کانیهای خانواده نمکها به کمک اسیدهای چرب	کربناتها، فسفاتها، سولفاتها و فلوئورها
بازداشت کوارتز و گانگهای سیلیکاته و همچنین کلسیت	سیلیکات و متاسیلیکات سدیم $(Na_2O.mSiO_2)$
جهت بازداشت بعضی کانیها	غلظت یون H^+
بازداشت میندریت، تورمالین، کوارتز و توپاز	اسید فلو سیلیسیک
جهت بازداشت کوارتز	فلوئوریک
بازداشت کالکوپیریت و کالکوسیت	هیپو کلرید سدیم
بازداشت پیریت و پنتلاندیت	آهک
محدوده کاربرد	بازداشت‌کننده‌ها آلی
بازداشت کلسیت و دولومیت	اتر پلی گلیکول
بازداشت رسها، گالن، اکسیدهای آهن، میکا و تالک	نشاسته و دکسترین
بازداشت هماتیت، کلسیت، دولومیت، آپاتیت و تالک	کربوکسی متیل سلولز
بازداشت تالک و کانیهای سیلیکاته	صمغ و گارها
بازداشت کلسیت و دولومیت	تانن و کبراکو

۲-۷-۲- نکاتی در مورد سیلیکات سدیم

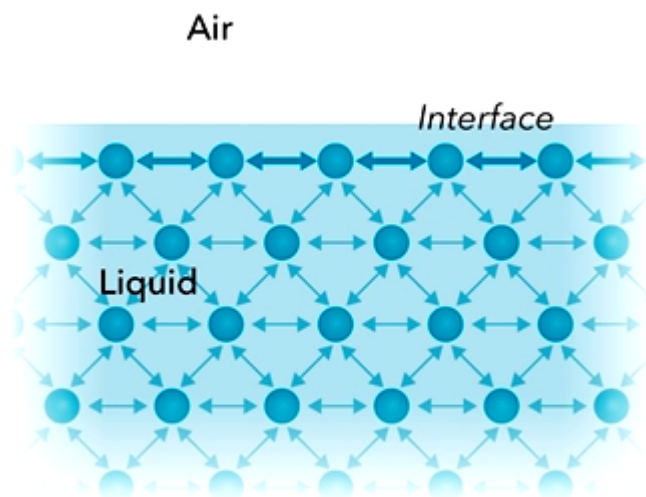
این بازدارنده دارای فرمول $Na_2O.mSiO_2$ است. میزان تجزیه این ماده در آب (پلیمریزاسیون) به pH محیط و نسبت SiO_2 به Na_2O آن بستگی دارد.

این ماده علاوه بر خاصیت بازدارندگی، به عنوان متفرق‌کننده نرمه‌ها و نیز فعال‌کننده فلورین نیز استفاده می‌شود.

۸-۲- پدیده کشش سطحی (Surface tension)

مولکولهای آب بین سطح و عمق تردد دوطرفه دارند (شکل ۴-۲). بنابراین، مولکولها مقداری انرژی آزاد دارند.

انرژی ایجاد شده در سطح را کشش سطحی (mN/m یا dyn/cm) می‌نامند. انرژی ایجاد شده در سطح مایع بیشتر از عمق آن و از نوع انرژی پتانسیل است. جنس این نیروها احتمالاً از نوع الکتریکی است.



شکل ۴-۲- جاذبه مولکولی در موقعیت‌های مختلف مولکولها

اگر بر روی سطح آب مقداری ماده معدنی که قبلاً نرم کرده‌ایم بریزیم، خواهیم دید که گانگ ماده معدنی به زودی غرق می‌شود. علت این امر در درجه اول زاویه تماس آب با جامد است که بسیار کوچک است و در نتیجه جسم زودتر خیس شده و غرق می‌شود؛ همچنین می‌توان گفت که در اثر تماس سطح گانگ با سطح آب، مقاومت (یعنی کشش سطحی) آن کم می‌شود و مولکولهای سطحی آب، قدرت لازم را برای نگهداری وزن ذره ندارند و در نتیجه غرق می‌شود.

از سوی دیگر در همین شرایط، سولفیدهای فلزی نسبت به نیروی کشش سطحی مقاومت بیشتری دارند و دیرتر غرق می‌شوند. علت آن است که سولفیدهای فلزی دارای بار منفی هستند و وجود بار منفی سبب بالا رفتن کشش سطحی می‌شود.

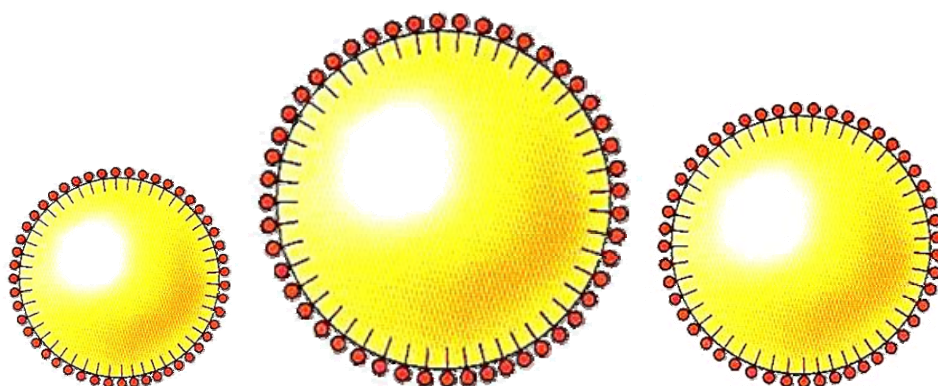
۲-۹- کفسازها (Frothers)

قانون کلی: یک سیال خالص با ویسکوزیته کم و یا سیالی که حاوی مواد آبدوست باشد توانایی تولید کف را ندارد.

کفسازها ترکیبات فعال سطحی هستند که از یک گروه قطبی و یک زنجیر هیدروکربنی تشکیل شده‌اند. گروه قطبی در کفسازها یکی از عوامل OH ، OH-C=O ، =C=O ، -NH_2 ، $\text{-SO}_2\text{OH}$ و $\text{-OSO}_2\text{OH}$ می‌باشد.

چنانچه در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، مولکولهای کفساز به نحوی در فصل مشترک هوا و آب قرار می‌گیرند که گروه قطبی یا آبدوست به سمت آب و زنجیر غیرقطبی هیدروکربنی یا آبران به سمت هوا جهتگیری می‌کنند.

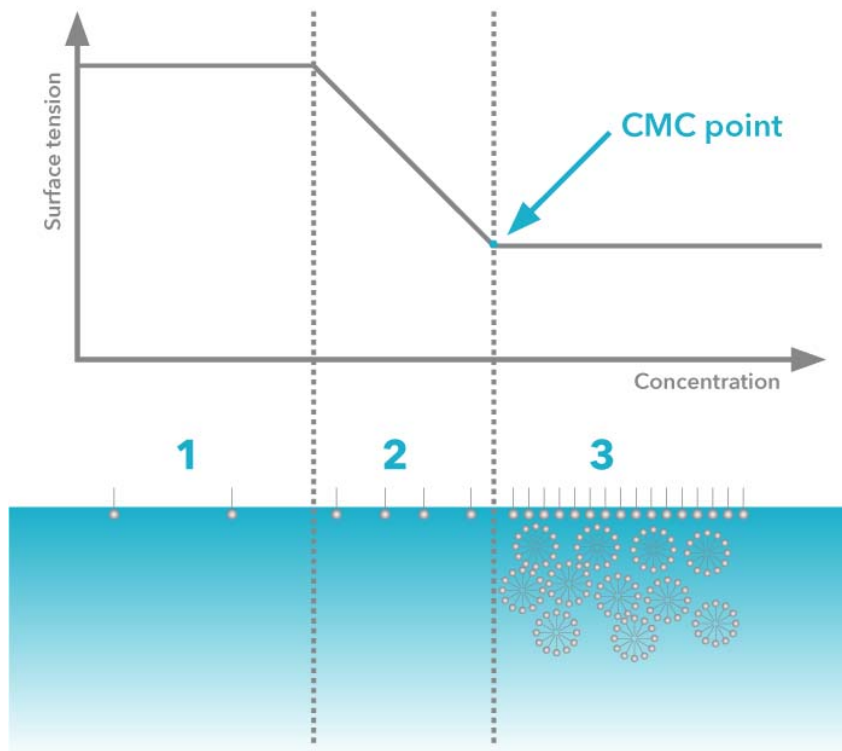
تجمع کفسازها در سطح، به دلیل ایجاد بار همنام از تماس و ادغام حبابها جلوگیری می‌کنند. علاوه، این مواد کشش سطحی آب را کاهش می‌دهند؛ نیروهایی که در اثر کاهش کشش سطحی حول حبابها تشکیل می‌شوند از ترکیدن حبابها نیز جلوگیری می‌کنند.



شکل ۲-۵- جهتگیری مولکولهای کفساز در سطح حبابها

علاوه بر توانایی کفسازها در تشکیل کف، این مواد نقشهای دیگری نیز در محیط پالپ ایفا می کنند:

- تشکیل حبابهای ریزتر؛ بدین ترتیب توزیع هوا در سلول فلوتاسیون بهبود خواهد یافت.
 - کاهش میزان ادغام حبابها
 - کفسازها کنترل کننده شکل حباب هوا نیز هستند و حباب هوا در حضور کفساز کروی تر است و سرعت صعودی کندتری دارد.
 - افزایش مقاومت (سطحی) حبابها و لذا، پایداری کف.
- نکته:** پدیده تشکیل میسل برای کفسازها نیز برقرار است:



کفسازهای را می توان بر اساس حساسیت به pH، انحلال پذیری، قابلیت کفسازی / کلکتوری، و ارتباط گزینش پذیری / توان کفسازی تقسیم بندی نمود که روش اول متداولترین است. بر اساس حساسیت به pH، کفسازها عبارتند از:

- **کفسازهای اسیدی:** این کفسازها در pH اسیدی کار آمد هستند و در محیطهای قلیایی، خواص کفسازی آنها کاهش می یابد:

- **فنولها:** این ترکیبات، الکل‌های آروماتیک نیز نامیده می‌شوند. مهمترین کفساز از انواع فنولها، اسید کریزیلیک است. از مخلوط اسیدهای چرب و کریزول در فلوتاسیون اسپودومن و فناسیت استفاده می‌شود.
- **آلکیل سولفوناتها:** کفسازهای آنیونی هستند که از یک هیدروکربن آروماتیک و یک رادیکال آلیفاتیک تشکیل شده‌اند. علیرغم خواص کفسازی مطلوب، به دلیل مشکلات عملیاتی ناشی از حضور گوگرد در ساختار این کفسازها، استفاده از آنها محدود شده است.
- **کفسازهای قلیایی:** این کفسازها از خانواده پیریدینها هستند و برای فلوتاسیون کانه‌های فلزات پایه مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- **کفسازهای خنثی:** این کفسازها مهمترین گروه کفسازها هستند که در کلیه فرایندهای فلوتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کفسازها هم در شرایط اسیدی و هم قلیایی خواص خود را حفظ می‌کنند:
- **الکل‌های آلیفاتیک:** این کفسازها ترکیبی از الکل‌های ۶-۸ کربنی هستند. متداولترین این کفسازها متیل ایزوبوتیل کرینول (MIBC) است.
- **الکل‌های حلقوی و روغنهای طبیعی:** این کفسازها در واقع مخلوطی از الکل‌های حلقوی، اترها، تریپنئولها و کتونها هستند. روغن کاج پرمصرفترین انواع این نوع کفسازها است. این کفسازها نسبت به دیگر انواع کفسازها، به حضور کانیهای رسی حساسیت بسیار کمتری دارند و بنابراین، به صورت مخلوط با الکل‌های آلیفاتیک در فلوتاسیون کانه‌های پورفیری مس و فلزات پایه حاوی رس و نیز زغال، مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- **آلکوکسی پارافینها:** کفسازهای این گروه بر اساس دو ساختار TEB (۱،۱،۳-تری اتوکسی بوتان) و شتابدهنده Powell تهیه شده‌اند. کف تولید شده توسط این کفسازها مشابه با کف حاصل از روغن کاج است. بعلاوه، گزینش‌پذیری مطلوبی داشته و نرخ فلوتاسیون کانیهای روی و مس را بهبود می‌دهند. بیشترین کاربرد این کفسازها در فلوتاسیون کانیهای اکسیدی مسی است که به روش سولفیداسیون اصلاح شده‌اند.

- پلی گلیکول اترها: این کفسازها به همراه MIBC در حدود ۹۰٪ نیاز کفسازهای مورد استفاده در فلوتاسیون کانه‌های فلزی را تأمین می‌کنند. انواع کفسازهای متداول Dowfroth مانند DF-200، DF-250 و DF-1012 از این نمونه هستند. وزن مولکولی و طول زنجیر هیدروکربنی پلی گلیکول اترها تعیین‌کننده قابلیت کفسازی آنها است. کفسازی که وزن مولکولی بیشتری داشته باشد کفی پایدارتر ولی با گزینش‌پذیری کمتری تولید می‌کند.
 - پلی پروپیلن گلیکول اترها: این کفسازها معمولاً در فلوتاسیون فلزات پایه استفاده می‌شوند. این کفسازها کفی پایدار با قابلیت حمل نسبتاً بالا تولید می‌کنند.
 - پلی گلیکول گلیسرول اترها: این کفسازها با نامهای تجاری XK35004.00L، XK35004.01L و XK35004.02L به بازار عرضه می‌شوند. این کفسازها کفی نسبتاً پایدار با بافتی ریز تولید می‌کنند؛ در محدوده $pH=3/5-12/3$ پایدار بوده و معمولاً در فلوتاسیون با محیطهای قلیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- ویژگیهای کف حاصل از انواع کفسازهای در **جدول ۲-۴** و مقدار مصرف کفسازهای متداول در **جدول ۲-۵** ارائه شده است.

جدول ۲-۴- ساختار کلی کف حاصل از معرفهای فلوتاسیون

نوع معرف	نام	ویژگیهای کف حاصل
	روغن کاج	حبابهای کوچک، ساختار به هم پیوسته، به راحتی متلاشی می‌شود
R-OH	اسید کریزلیک	مشابه با روغن کاج ولی با حبابهای درشتتر
	MIBC	حبابهای درشت، با تراکم کم؛ برای تراکم بیشتر باید غلظت کفساز را افزایش داد
$R'(RO)_xOH$	پلی پروپیلن گلیوکولها	ساختار بسیار متراکم، به راحتی متلاشی می‌شود، حبابها از کف MIBC درشتتر است
$(R'O)_xR$	تری اتوکسی بوتان	مشابه با کف روغن کاج
RCOOH	اسیدهای چرب	بسیار پایدار با ساختاری متراکم و توده توده، از هم پاشی کف حتی با افشانه آب نیز بسیار مشکل است
RSO_3Na	سولفوناتها	
RNH_3	کلکتورهای آمینه	

جدول ۲-۵- انواع کفسازها و کاربرد آنها

کفساز	کاربرد و مقدار مصرف
متیل ایزوبوتیل کربینول (MIBC)	در فلوتاسیون کانیهای سولفیدی ($\sim 30 \text{ g/l}$) و زغالسنگ ($\sim 125 \text{ g/l}$)
روغن کاج	در فلوتاسیون کانیهای سولفیدی ($\sim 30 \text{ g/t}$) و زغالسنگ ($\sim 125 \text{ g/t}$) و سیلیکاتها (همراه با کلکتورهای کاتیونی)
کرزیل (اسید کرزلیک)	در فلوتاسیون کانیهای سولفیدی ($\sim 40 \text{ g/t}$)
پلی اترهای هیدروکسیله	در فلوتاسیون کانیهای سولفیدی ($\sim 25 \text{ g/t}$)

فصل سوم

ماشینها و مدارهای فلوتاسیون

۳-۱- مقدمه

عملیات فلوتاسیون در تجهیزاتی انجام می‌شود که ماشین فلوتاسیون نامیده می‌شوند.

ماشینهای فلوتاسیون به دو گروه مکانیکی و هوایی (پنوماتیک) تقسیم می‌شوند:

- در ماشینهای مکانیکی، حبابها توسط ایجاد اغتشاش در محیط توسط همزن ایجاد می‌شود.
- در ماشینهای هوایی، حبابها توسط تجهیزاتی که حبابساز یا اسپارجر (Sparger) نامیده می‌شود تولید می‌شود.

ماشینهای دیگری نیز طراحی شده‌اند که در آنها، حبابهای هوا با مکانیزم هیدرولیز تولید می‌شود که تحت شرایط و به منظور اهداف خاصی بکار می‌روند.

۳-۲- ماشینهای مکانیکی

ماشینهای مکانیکی از قسمتهای زیر تشکیل شده‌اند:

- سلول فلوتاسیون با شکل هندسی مشخص که نشان‌دهنده شکل کلی سلول است.
- وسیله‌ای برای هدایت جریان هوا به داخل سلول
- روتور و استاتور که به ترتیب نقش همزن و کنترل‌کننده تلاطم محیط پالپ در بخش فوقانی سلول را به عهده دارند.
- وسیله‌ای برای تخلیه پیوسته کف از سلول (پارو)

قسمتهای فوق و نحوه عملکرد ماشینهای فلوتاسیون در شکل زیر نشان داده شده است.



ماشینهای فلوتاسیون باید قادر به انجام عملیات زیر باشند:

- ذرات را به حالت تعلیق درآورند
- حبابهای هوا را در محیط پالپ پراکنده سازند
- شرایط مناسب را برای تماس بین ذرات آبران و حبابهای هوا ایجاد کنند
- انتقال کلیه ذرات وارد شده به داخل سلول را به دو بخش کنسانتره و باطله هدایت کنند
- ایجاد محیطی نسبتاً آرام در بخش فوقانی سلول به منظور جلوگیری از رها شدن ذرات آبران از سطح حبابها
- قدرت کافی برای متفرق کردن مجدد ذرات پس از قطع برق
- کنترل ارتفاع ستون کف و سطح پالپ در داخل سلول
- کنترل حباب هوا و کاهش ابعاد درشت به ابعاد ریز
- کنترل انرژی و نگهداری ساده
- خروج مرحله‌ای ذرات درشت باطله که ممکن است به سختی به بخش باطله حمل شوند.

- تجهیزات لازم برای انتقال کف به مرحله شستشو و یا باطله به بخش رملگیر

تفاوت ماشینهای مکانیکی در موارد زیر است:

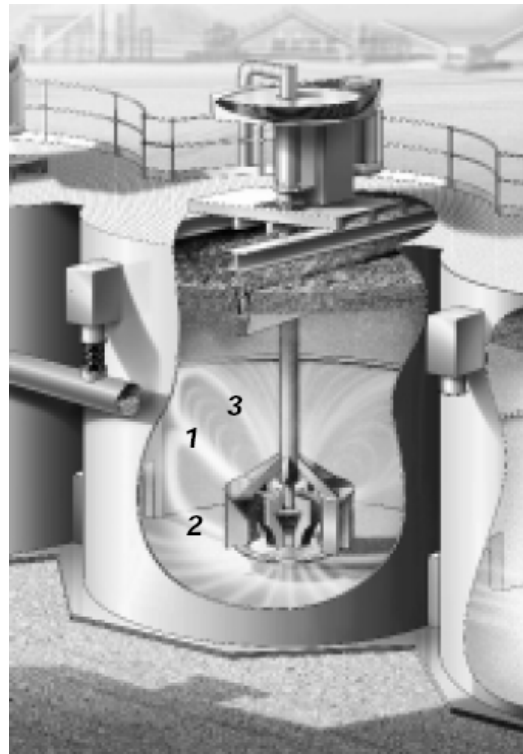
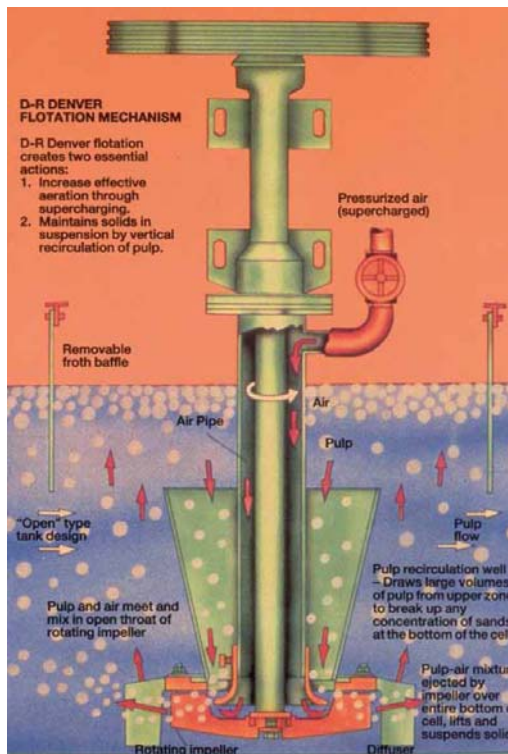
- شکل سلول (متوازی السطوح و یا استوانه‌ای): به شرکت سازنده بستگی دارد.
- ابعاد سلول: سلولهای بزرگ به دلیل ضخیم بودن لایه کف، نسبت به سلولهای کوچک عملکرد انتخابی‌تری دارند. در سلولهای بزرگتر، به دلیل کاهش نقاط کنترلی مدار می‌توان محصول را با تنظیم شدت جریان هوا و سطح پالپ به صورت کیفی کنترل نمود. به علاوه، به دلیل استفاده بیشتر از فضا توسط این سلولها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نیروی انسانی، مصرف انرژی و هزینه‌های نگهداری کاهش می‌یابد. حجم سلولهای فلوتاسیون معمولاً بین ۸ تا ۴۰ متر مکعب است که ممکن است در مواردی به ۳۰۰ متر مکعب نیز برسد. متداولترین حجم بین ۸/۵ تا ۱۴/۲ متر مکعب است.
- شکل روتور و استاتور: باید متناسب با ابعاد و شکل سلول باشد.
- نحوه هوادهی به سلول: انواع سلولهای مکانیکی عبارتند از:
 - سلولهای خود هوامکش (Self-aerated cell) که هوا در اثر خلا ایجاد شده در محل اغتشاش سلول، از طریق مجرای تعبیه شده در ستون روتور به داخل سلول جریان می‌یابد.

- سلولهای هوادهی شده (Forced-air cell) که هوای مورد نیاز برای تولید حباب توسط پمپ از طریق مجرای میانی ستون روتور به داخل ماشین تزریق می‌شود.

۳-۲-۱- الگوی جریان در سلولهای مکانیکی

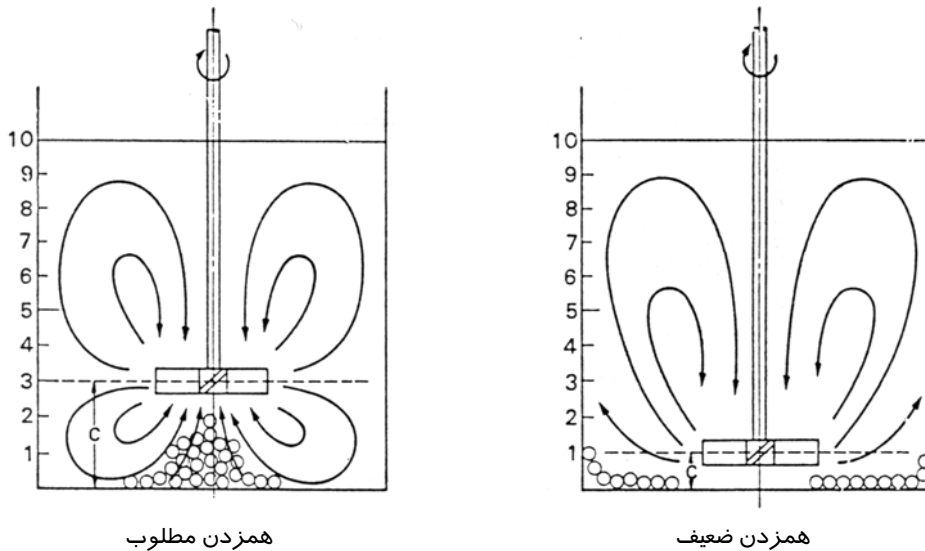
الگوی جریان ایجاد شده توسط روتور و استاتور در سلولهای مکانیکی بسیار مهم است. الگوی جریان باید به نحوی باشد که ذرات ورودی به سلول بطور کامل در سلول توزیع یابند. الگوی جریان در داخل سلولهای فلوتاسیون از سه بخش تشکیل شده است:

۱. الگوی شعاعی کامل از محل همزن تا دیواره سلول
۲. بازگشت اولیه جریان به ناحیه پایینی همزن
۳. چرخش ثانویه جریان به سمت بالا



با توجه به ضرورت ایجاد محیطی آرام در سطح سلول، به منظور حفظ و پایداری ذرات متصل به حبابهای هوا، همزن باید نزدیک به کف سلول قرار گیرد زیرا جریان حلقوی ایجاد شده در

خارج از روتور و استاتور ممکن است سوسپانسیون ذرات در سلول را ناپایدار و در کف سلول ته‌نشین سازد. در چنین شرایطی احتمال ریزش پالپ از داخل به خارج سلول بسیار زیاد است.



۳-۲-۲- پارامترهای مؤثر بر عملکرد ماشینهای مکانیکی

- سرعت محیطی روتور بر مقدار هوای ورودی به سلول مؤثر است.
- دانسیته پالپ بر میزان هوای مورد نیاز و مصرف انرژی ماشین مؤثر است.
- تزریق پالپ در محلی زیر همزن ممکن است موجب قفل شدن روتور شود.
- سطح پالپ در سلول بر اغتشاش داخل سلول مؤثر است.
- مقدار کف‌ساز بر ابعاد حبابها و مقدار هوای ورودی به ماشین مؤثر است.
- موقعیت روتور و استاتور بر هواگیری و مصرف انرژی ماشین مؤثرند.
- مکانیزم تخلیه کف از سلول بر کیفیت کف مؤثر است.

۳-۲-۳- چیدمان سلولهای فلوتاسیون

یکی از پارامترهای مهم در فرایند فلوتاسیون، زمان ماند (Retention time) مواد در سلول برای رسیدن به بازیابی مورد نظر و جدایش مطلوب است. زمان ماند تعیین‌کننده حجم و تعداد سلولهای مورد نیاز برای رسیدن به بازیابی هدف است.

با توجه به اینکه امکان ساخت سلولی که پاسخگوی کل تناژ ورودی به واحد فلوتاسیون برای فرآوری باشد در عمل وجود ندارد، بنابراین، برای رسیدن به حجم فرآوری مورد نیاز، از مجموعه‌ای از سلولهای کنار هم که محصول هر سلول خوراک سلول بعدی را تأمین می‌کند استفاده می‌شود که به این گروه از سلولها بانک فلوتاسیون می‌گویند.

بر اساس زمان ماند، دو چیدمان قابل پیاده‌سازی است:

- استفاده از سلولهای کوچک و بانک سلولی طویل
- استفاده از سلولهای بزرگ و بانک کوتاهتر

گزینه اول بسیار متداول و مناسب برای کارخانه‌های با تناژ کم تا متوسط است. مزایای این چیدمان عبارت است از:

- کاهش فرایند میانبر زدن (Short circuiting) مواد
- امکان کنترل دقیقتر مدار و فرایند
- بازیابی بیشتر

گزینه دوم برای کارخانه‌های با تناژ بالا مناسب است. مزایای این نوع چیدمان (با بهره‌گیری از فناوری روز) عبارت است از:

- بهبود الگوی جریان در سلولهای بزرگ، میانبر زدن مواد را کاهش می‌دهد
- امکان استفاده از دستگاه‌های آنالیز برجا (on-line analyzer) را فراهم می‌کند
- تمهیدات و هزینه‌های نگهداری مکانیکی کاهش می‌یابد
- مصرف انرژی برای حجم یکسان نسبت به سلولهای کوچکتر کاهش می‌یابد
- کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری

۳-۲-۴- مدارهای سلولهای فلوتاسیون

طراحی مدارهای فلوتاسیون به نوع ماده معدنی، درجه آزادی کانیهای باارزش، عیار و بازیابی مورد نظر محصول (هدف فلوتاسیون) بستگی دارد.

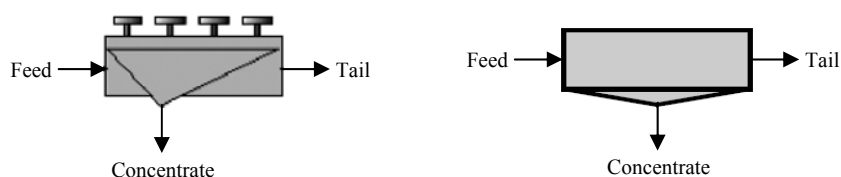
بر اساس هدف فلوتاسیون، سه مرحله برای مدارهای فلوتاسیون تعریف شده است:

- **مرحله رافر یا پرعیارکنی (Rougher stage):** هدف از این مرحله جدایش اولیه کانیهای باارزش از گانگ است. رافر ممکن است در دو مرحله انجام شود. در مرحله رافر اولیه معمولاً ۱۰ تا ۲۰ درصد خوراک مدار برای رسیدن به محصولی با عیار مطلوب و بازیابی

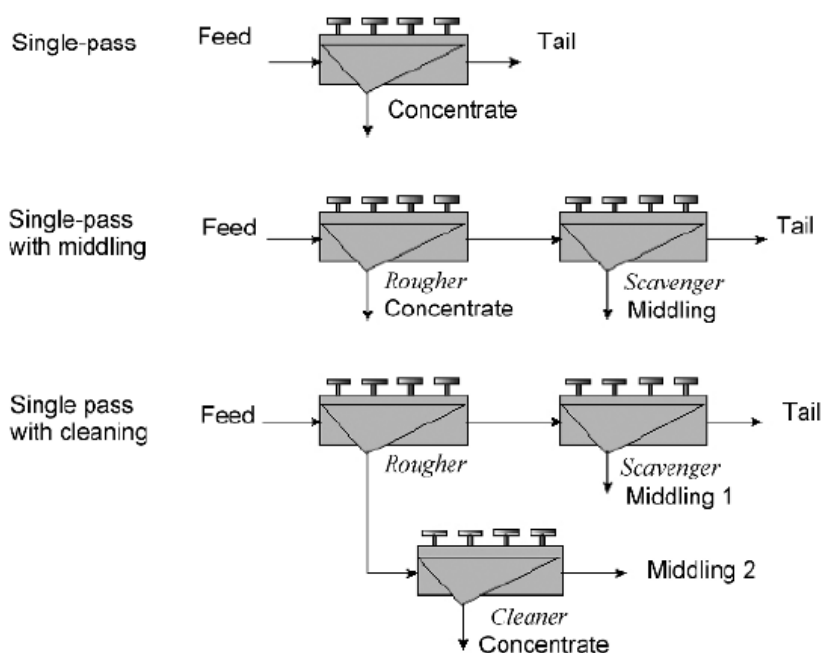
متوسط فرآوری می‌شود در حالی که در مرحله رافر ثانویه، ۹۰ تا ۶۰ درصد خوراک مدار برای رسیدن به حداکثر بازیابی فرآوری می‌شود.

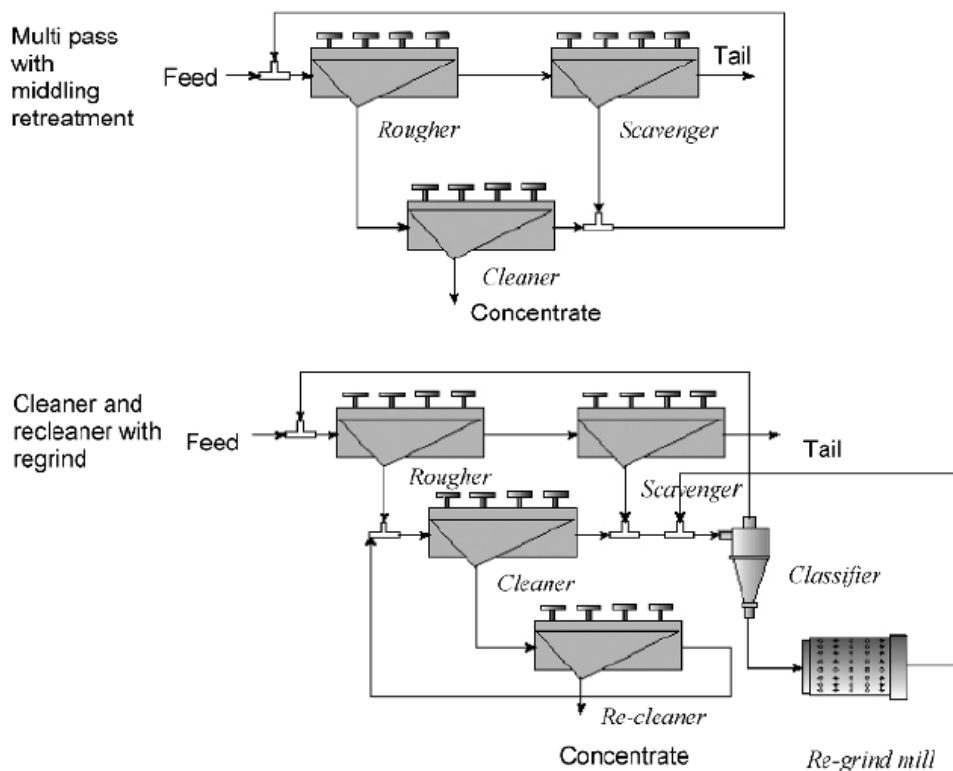
- **مرحله رمق‌گیری (Scavenger cell):** حجم این مرحله معمولاً به اندازه ظرفیت مرحله رافر است. هدف از این مرحله افزایش بازیابی (جدا کردن کانیهای باارزش از خوراک) تا حد ممکن است. معمولاً باطله مرحله رافر خوراک مرحله رمق‌گیری را تشکیل می‌دهد.
- **مرحله شستشو یا کلینر (Cleaner cells):** هدف از این مرحله به حداکثر رساندن عیار کنسانتره نهایی مدار است. زمان ماند مرحله کلینر در حدود ۶۵ تا ۷۵ درصد مرحله رافر است. درصد جامد این مرحله نیز از مرحله رافر کمتر است. در این مرحله از بانکهای کوتاهتری نسبت به مرحله رافر استفاده می‌شود.

نکته: در طراحی مدارهای فرآوری برای نشان دادن سلولهای فلوتاسیون از شکلهای زیر استفاده می‌شود:



هر مدار شامل مجموعه‌ای از بانکها است که نسبت به یکدیگر با ارتفاع جایگزاری می‌شوند تا انتقال مواد بین آنها از طریق نیروی ثقل انجام شود. انواع متداول مدارهای فلوتاسیون:





۳-۲-۵- طراحی مدارهای فلوتاسیون

طراحی مدارهای فلوتاسیون از شامل چهار مرحله کلی است:

- مطالعات آزمایشگاهی و در صورت نیاز نیمه‌صنعتی برای تعیین پارامترهای عملیاتی و ضرایب طراحی
- تعیین حجم فرایندی کل (V_f):

$$V_f = \frac{Q \times T_r \times S}{60 \times C_a}$$

V_f : حجم فرایندی کل (m^3)

Q : دبی حجمی خوراک (m^3/h)

T_r : زمان ماند فلوتاسیون (min). مقادیر متداول زمان ماند برای کانیهای مختلف در جدول

۱-۳ نشان داده شده است. این مقدار را می‌توان در آزمایشگاه یا واحدهای نیمه‌صنعتی تعیین کرد.

S : فاکتور بزرگ مقیاس کردن؛ چنانچه زمان ماند توسط مشتری و یا بر اساس داده‌های

صنعتی و یا آزمایشهای نیمه‌صنعتی پیوسته تعیین شده باشد، مقدار فاکتور بزرگ مقیاس کردن

برابر واحد و در صورتی که مقدار فاکتور با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی تعیین شده باشد بین $1/6$ تا $2/6$ در نظر گرفته می‌شود.

C_a : فاکتور هوادهی که مقدار هوای لازم برای پالپ را بیان می‌کند. این مقدار معمولاً 0.85 در نظر گرفته می‌شود.

همزن در سلولهای مکانیکی مانند پمپی رفتار می‌کند که وظیفه آن گرداندن پالپ در داخل سلول است. بنابراین، می‌توان دبی (m^3/min) را بر اساس مشخصات همزن نیز تخمین زد:

$$Q = 0.75 \omega D^3$$

ω : سرعت چرخش همزن (rpm)

D : قطر همزن (m)

از رابطه فوق نکات زیر نتیجه می‌شود:

- در نرخهای بسیار کم ($Q/\omega D^3 < 0.02$)، هوای ورودی به سلول به دلیل عملکرد پمپ مانند، با شدت وارد مرکز فضای میانی پشت پره‌های همزن می‌شود. در این شرایط، ابعاد و تعداد حبابها کم است.

- در نرخهای بالاتر ($0.02 < Q/\omega D^3 < 0.05$)، در پشت پره‌ها پدیده حفره‌زایی (cavitations) به دلیل افزایش نرخ هوا، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این حالت، ابعاد و تعداد حبابها افزایش می‌یابد.

- در نرخهای بسیار بالا ($Q/\omega D^3 > 0.05$)، همزن طغیان می‌کند (Flood) و فضای بین پره‌ها توسط ماریچهای بزرگی از هوا پر (کور) شده و حبابهای بسیار بزرگی تشکیل می‌شود.

- **تعیین تعداد سلولهای مورد نیاز:** با تقسیم حجم فرایندی بر حجم سلول مورد نظر، تعداد سلولها مشخص می‌شود. حجم سلول بر اساس ظرفیت قابل پذیرش دبی خوراک آن که توسط شرکت تولیدکننده سلول مشخص می‌شود، تعیین می‌گردد.

در جدول ۱-۳، تعداد متداول سلولهای مورد نیاز برای کانیهای مختلف آورده شده است.

نکته ۱: چنانچه تعداد سلول تعیین شده در محدوده ذکر شده در جدول ۱-۳ نبود، باید محاسبات را برای سلولی با حجم متفاوت انجام داد.

نکته ۲: چنانچه تعداد سلول تعیین شده برای دو سلول با حجم متفاوت در محدوده مجاز بود، انتخاب سلول بر اساس ملاحظات اقتصادی صورت خواهد گرفت.

نکته ۳: داده‌های جدول ۱-۳ برای سلولهای رافر ارائه شده است. برای سلولهای کلینر درصد جامد ۶۰٪ معادل رافر و زمان ماند ۶۵٪ معادل رافر در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱-۳- داده‌های انتخاب سلول برای مدارهای فلوتاسیون

Mineral	% solids in feed	Retention time min (normal)	No. of cells/bank
Barite	30-40	8-10	6-8
Copper	32-42	13-16	8-12
Fluorspar	25-32	8-10	6-8
Feldspar	25-35	8-10	6-8
Lead	25-35	6-8	68
Molybdenum	35-45	14-20	10-14
Nickel	28-32	10-14	8-14
Phosphate	30-35	4-6	4-5
Potash	25-35	4-6	4-6
Tungsten	25-32	8-12	7-10
Zinc	25-32	8-12	6-8
Silica (iron ore)	40-50	8-10	8-10
Silica (phosphate)	30-35	4-6	4-6
Sand (impurity)	30-40	7-9	6-8
Coal	4-12	4-6	4-5
Effluents	as received	6-12	4-6

تعداد سلولها در بانک را می‌توان با استفاده از بازیابی مورد نظر از بانک نیز محاسبه نمود. زمان ماند ظاهری (θ) برابر است با نسبت حجم (V) به شدت جریان ورودی (Q) به بانک:

$$\theta = \frac{V}{Q}$$

چنانچه زمان لازم برای رسیدن به بازیابی R برابر T باشد و برای بدست آوردن همین بازیابی در مداری به n سلول که بطور پیوسته کار می‌کنند نیاز باشد، آنگاه:

$$\frac{\theta}{T} = \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{1-R}\right)} \left[\left(\frac{1}{1-R} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

- انتخاب الگوی چیدمان سلولها (مدار فلوتاسیون): هر بانک فلوتاسیون با یک مخزن خوراکدهی شروع و به یک مخزن تخلیه ختم می‌شود. چنانچه تعداد سلولها در هر بانک زیاد باشد، جهت کنترل و حفظ جریان پالپ بین هر چند سلول از یک مخزن میانی

استفاده می‌کنند. هر گروه سلولی که بعد از مخزن میانی قرار می‌گیرند با اندکی کاهش ارتفاع نسبت به افق نسبت به سلولهای قبل از مخزن میانی قرار می‌گیرند تا جریان پالپ افست پیدا نکند. به فاصله بین دو مخزن متوالی، بخش (Section) می‌گویند. تعداد سلولهای مجاز در هر بانک در جدول ۳-۱ آورده شده است. تعداد مجاز سلولها در هر بخش توسط شرکت تولیدکننده اعلام می‌شود.

چیدمان سلولها در هر بانک با الگوی F-(n-I-n...)-D بیان می‌شود که F مخزن خوراکدهی، I مخزن میانی و D مخزن تخلیه است. به عنوان مثال بانکی با الگوی F-4-I-3-D شامل ۷ سلول است که با چیدمان ۴ سلول بین مخازن خوراکدهی و میانی و ۳ سلول بین مخازن میانی و تخلیه طراحی شده است.

در جدول ۳-۲، چیدمانهای متداول بر حسب ظرفیت سلول و نوع ماده معدنی آورده شده است.

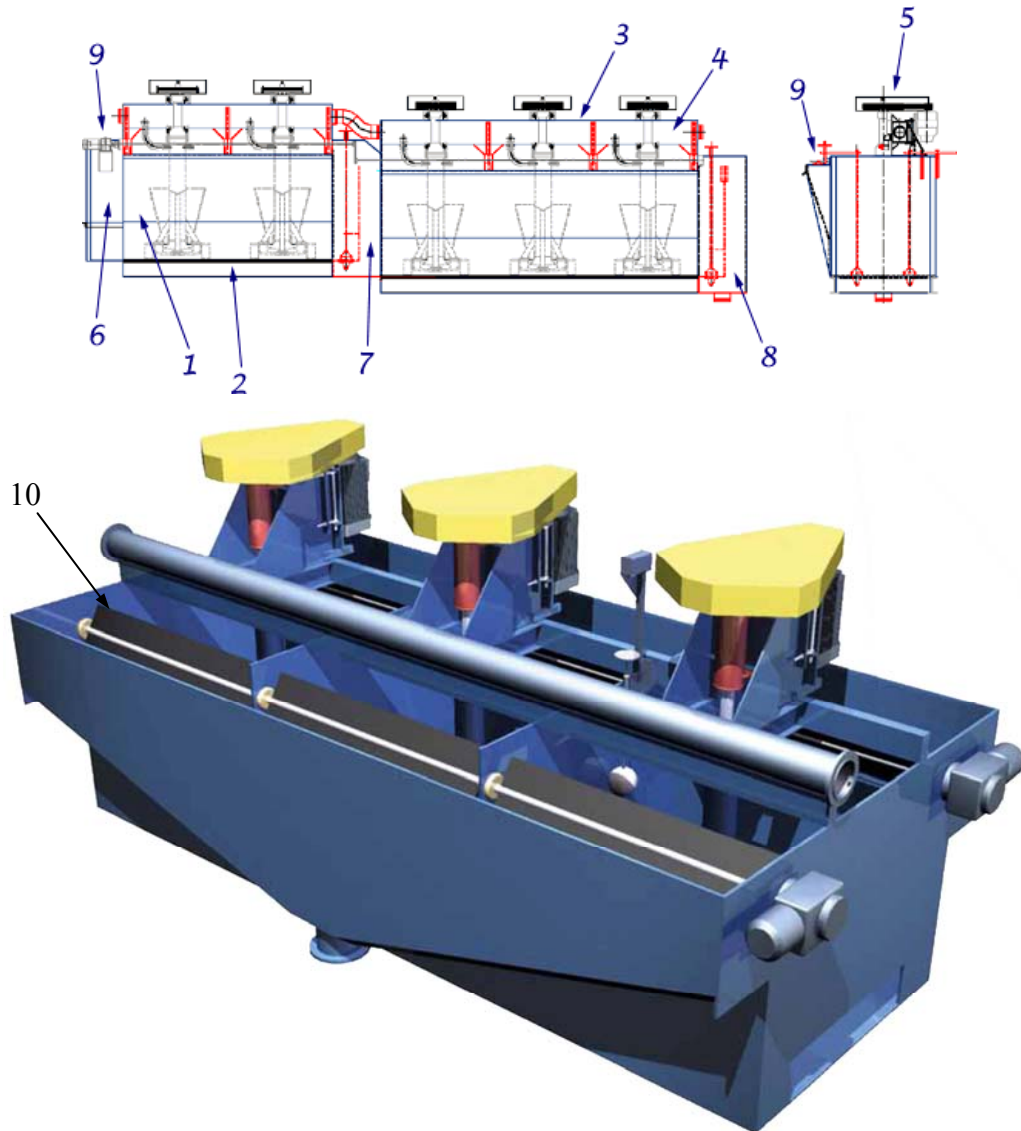
جدول ۳-۲- چیدمانهای متداول سلولها در بانک فلوتاسیون

چیدمان	ظرفیت	تعداد	مدار
Copper Circuit			
Rougher	38 m ³ capacity	6 cells	2-2-2
First Cleaner	8 m ³ capacity	6 cells	2-2-2
Second Cleaner	3 m ³ capacity	9 cells	2-2-2-3
Third Cleaner	3 m ³ capacity	6 cells	2-2-2
Zinc Circuit			
Rougher	38 m ³ capacity	6 cells	2-2-2
First Cleaner	8 m ³ capacity	5 cells	1-2-2
Second Cleaner	3 m ³ capacity	9 cells	2-2-2-3
Third Cleaner	3 m ³ capacity	5 cells	1-2-2
Copper Circuit			
Rougher	40 m ³ capacity	6 cells	2-2-2
First Cleaner	10 m ³ capacity	5 cells	1-2-2
Second Cleaner	5 m ³ capacity	6 cells	2-2-2
Third Cleaner	5 m ³ capacity	5 cells	1-2-2
Zinc Circuit			
Rougher	40 m ³ capacity	6 cells	2-2-2
First Cleaner	8 m ³ capacity	5 cells	1-2-2
Second Cleaner	5 m ³ capacity	6 cells	2-2-2
Third Cleaner	5 m ³ capacity	5 cells	1-2-2

قسمتهای تشکیل دهنده بانک سلولها در شکلهای زیر نشان داده شده است:

۱. مخزن سلول

۲. مخزن جمع آوری کف (کنسانتره)
۳. بدنه بالایی ماشین
۴. پوشش ایمنی (درپوش مشبک) سلولها
۵. موتور همزن
۶. مخزن خوراکدهی (Feed box)
۷. مخزن میانی (Intermediate or transition box)
۸. مخزن تخلیه (Discharge box)
۹. موتور چرخش پاروهای تخلیه کنسانتره
۱۰. پاروها



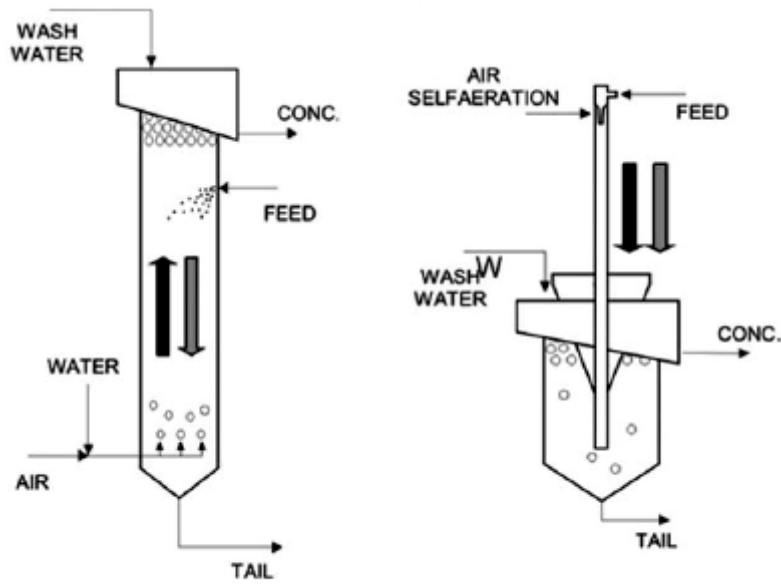


۳-۳- ماشینهای هوایی (پنوماتیک)

ماشینهای هوایی به دو گروه زیر تقسیم می‌شوند:

- با جریان هم جهت (Con-current)، که شامل انواع سلولهای جیمسون (Jameson) با ستون کوتاه و بلند می‌شود. در این ماشینها پالپ و جریان حبابها به صورت هم جهت وارد ماشین می‌شوند.
- با جریان مخالف (Counter-current)، که شامل سلولهای ستونی (Column cell) می‌شود. در این ماشینها پالپ و جریان حبابها در خلاف جهت یکدیگر در سلول حرکت می‌کنند.

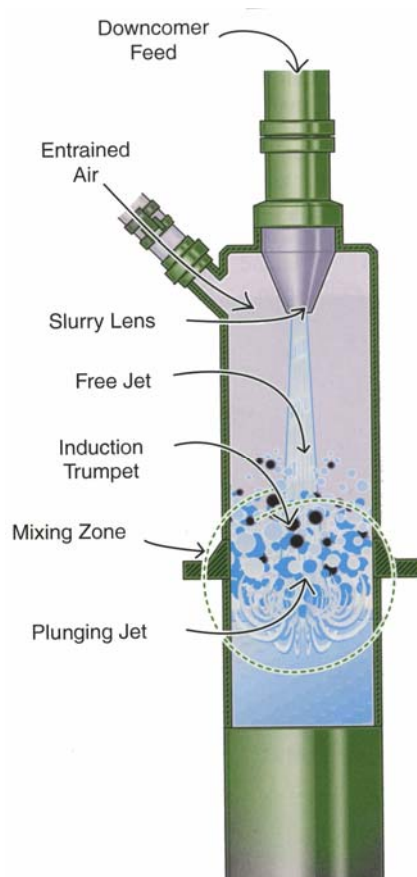
در این بخش، فلوتاسیون ستونی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



جریان مخالف

جریان هم جهت

(پیکان خاکستری: جریان پالپ، پیکان سیاه: جریان حبابها)



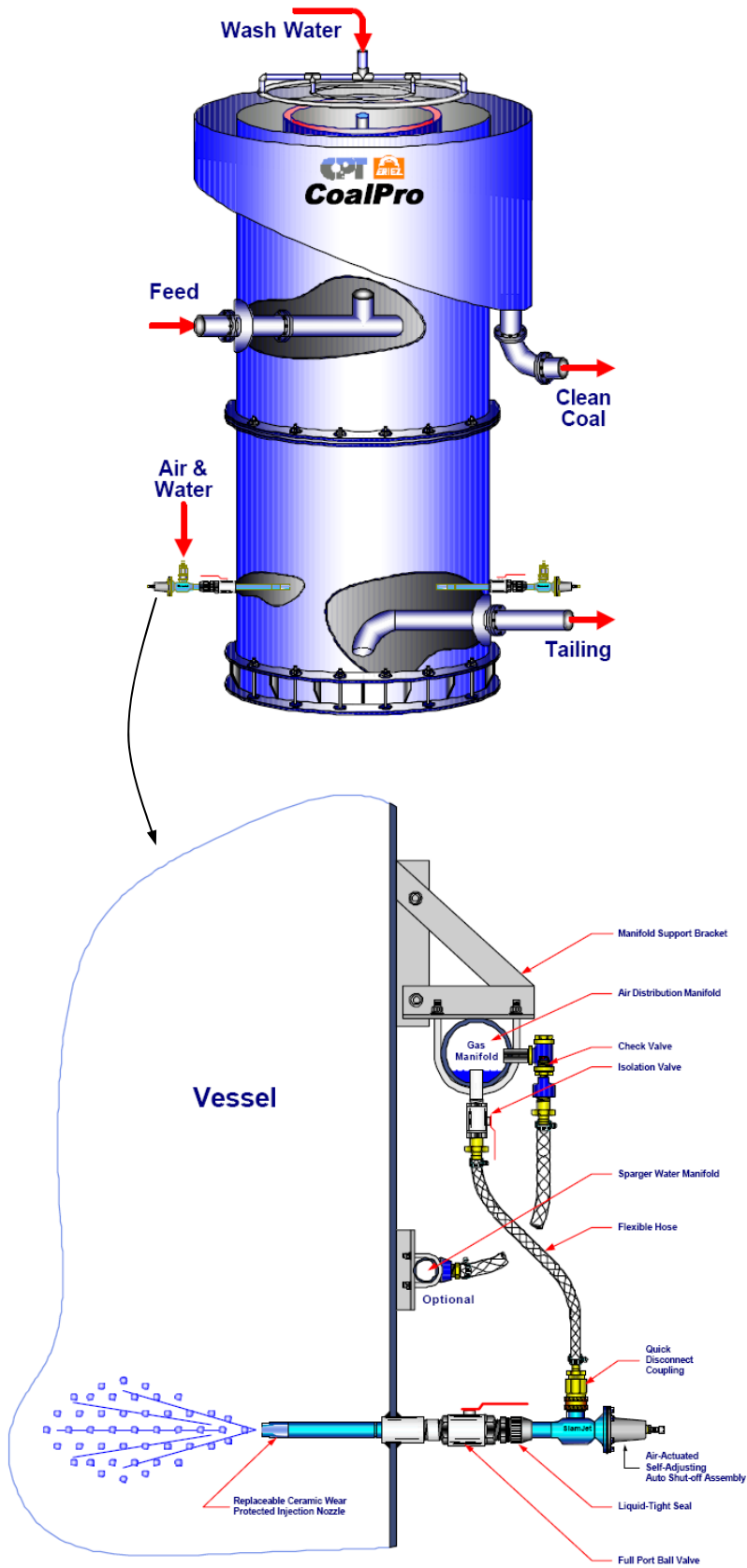
مکانیزم تولید حباب در سلولهای جیمسون

فلوتاسیون ستونی از روشهای جدید فلوتاسیون است که در دو دهه اخیر جایگاه ویژه‌ای در صنایع فرآوری پیدا کرده است.

با توجه به شکل، ماشین فلوتاسیون ستونی شامل یک ستون با قطر حداکثر ۴ متر و طول حداکثر ۱۲ متر است. در بعضی از کارخانه‌ها، ستونهایی با سطح مقطع مستطیلی (۲×۸×۱۴/۴ m) نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پالپ خوراک از محل یک سوم بالایی ستون با سرعتی در حدود ۱۰-۴۸ متر بر ساعت وارد ستون می‌شود. تزریق خوراک باید به نحوی باشد که در ستون ایجاد اغتشاش نشود. حبابهای هوا توسط تجهیزاتی به نام اسپارجر یا حبابساز که کمی بالاتر از کف ستون قرار دارند به درون ستون وارد می‌شوند. زمان ماند در سلولهای ستونی در حدود ۲۰-۱۰ دقیقه است. کنسانتره از طریق ستون کف در بالای ستون خارج می‌شود و باطله از پایین ستون به خارج پمپاژ می‌گردد. کف توسط سیستمی دوش مانند با آب شسته می‌شود.

تفاوتهای سلول ستونی با سلولهای مکانیکی:

- نداشتن همزن
 - نداشتن پاروی تخلیه کف
 - تولید حباب توسط اسپارجر به جای سیستم روتور/استاتور
 - استفاده از سیستم شستشوی کف (Wash water)
- مزایای فلوتاسیون ستونی و سلولهای ستونی:
- بهبود کارایی فرایند (بهبود ۲ تا ۵ درصدی عیار)
 - هزینه عملیاتی و سرمایه‌ای کمتر
 - کاهش مصرف مواد شیمیایی: در فلوتاسیون ستونی می‌توان درصد جامد را در پالپ افزایش داد و همین امر باعث کاهش مصرف مواد شیمیایی می‌شود.
 - کاهش زمان عملیات و کاهش مصرف انرژی: در مقایسه با فلوتاسیون مکانیکی، فلوتاسیون ستونی با یک بار عملیات کنسانتره‌ای را تولید می‌کند که همین کنسانتره با چهار بار تمیز کردن و شستشوی مجدد توسط فلوتاسیون مکانیکی به دست می‌آید.
 - نیاز به سطح مقطع کمتر
 - نگهداری آسانتر
 - کنترل دقیقتر



۳-۱-۳- انواع حبابسازها برای سلولهای ستونی

چنانچه گفته شد، سلولهای ستونی بر خلاف سلولهای مکانیکی برای تولید حباب از وسایل مکانیکی استفاده نمی‌کنند.

حبابسازهایی که برای سلولهای ستونی مورد استفاده قرار می‌گیرند باید دارای ویژگیهای زیر باشند:

- تولید حبابهای ریز و یکنواخت
- نگهداری آسان، حداقل گرفتگی مجاری و تعویض و تعمیر آسان

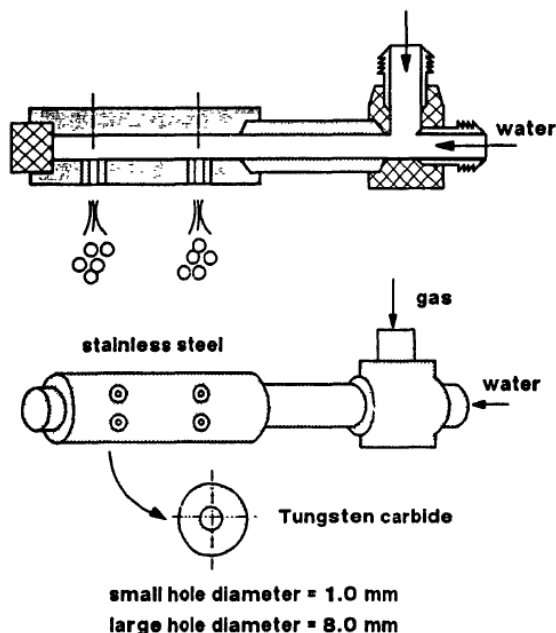
حبابسازهای سلولهای ستونی به انواع زیر تقسیم می‌شوند:

- **حبابسازهای داخلی:** که در داخل ستون نصب می‌شوند و شامل انواع زیر هستند:
 - پارچه‌های فیلتری و تیوبهای لاستیکی: عیب این حبابسازها تولید حبابهای درشت (۲-۳ mm) است.
 - تیوبهای فلزی و سرامیکی: عیب این حبابسازها، گرفتگی روزنه‌ها و در نتیجه نگهداری مشکل است.

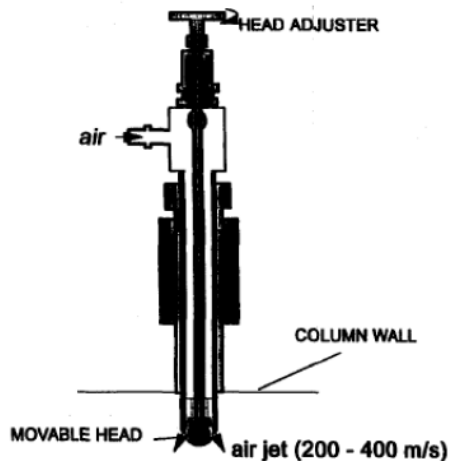
ایراد کلی حبابسازهای داخلی نیاز به تعداد زیاد آنها در هر سلول است به نحوی که کل سطح مقطع ستون را پوشش دهند. این حبابسازها هم به صورت افقی و هم عمودی نصب می‌شوند. روش نصب عمودی، احتمال گرفتگی روزنه‌ها را کاهش می‌دهد.

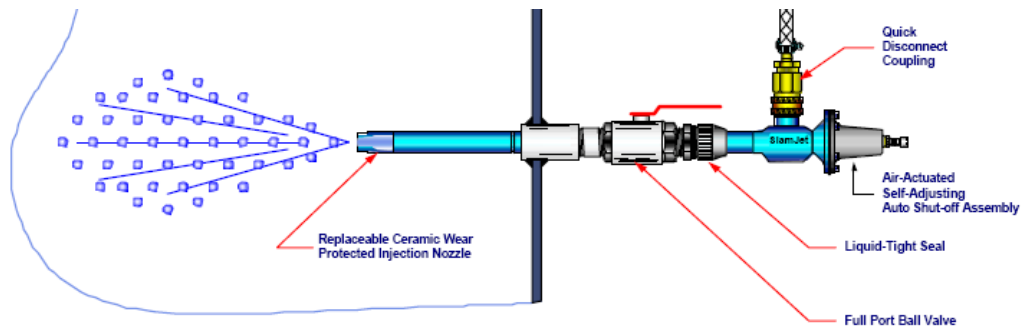
- **حبابسازهای خارجی:** که در خارج از سلول نصب و جریان حباب ایجاد شده را به داخل سلول هدایت می‌کنند. اساس کار این نوع حبابسازها، تولید حبابهای هوا به واسطه در تماس قرار دادن پالپ یا آب با جریان هوای فشرده است. مزیت عمده حبابسازهای خارجی به حداقل رسیدن احتمال گرفتگی حبابساز و در نتیجه نگهداری آسان آنهاست. انواع حبابسازهای خارجی عبارتند از:

- حبابساز USBM/Cominco: در این حبابسازها، در اثر برخورد جریانهای آب و هوای فشرده (با فشار ۷۰-۹۵ psi) در محفظه‌ای به قطر ۱ اینچ و طول ۱-۲ m، جتی از هوا شامل حبابهای ریز تولید می‌شود. مقدار آب اضافه شده معمولاً در حدود ۱٪ حجم گاز می‌باشد. مخلوط آب و حبابهای هوا از طریق یکسری منافذ ریز به قطر ۱ mm که در طول حبابساز تعبیه شده‌اند، وارد سلول می‌شوند.

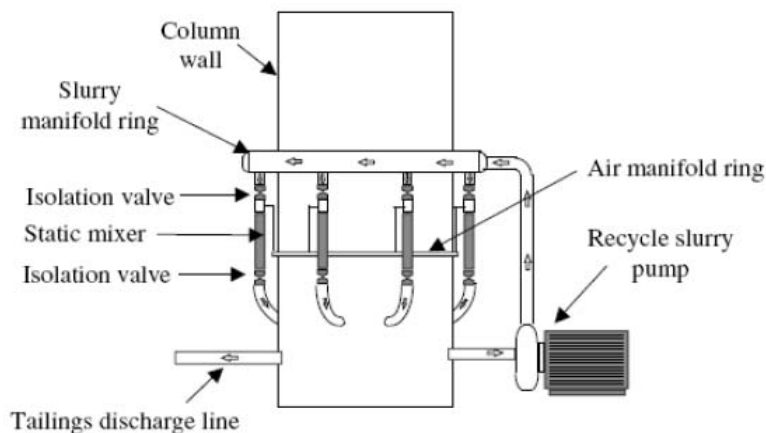
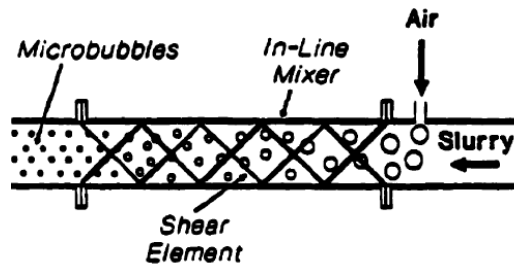


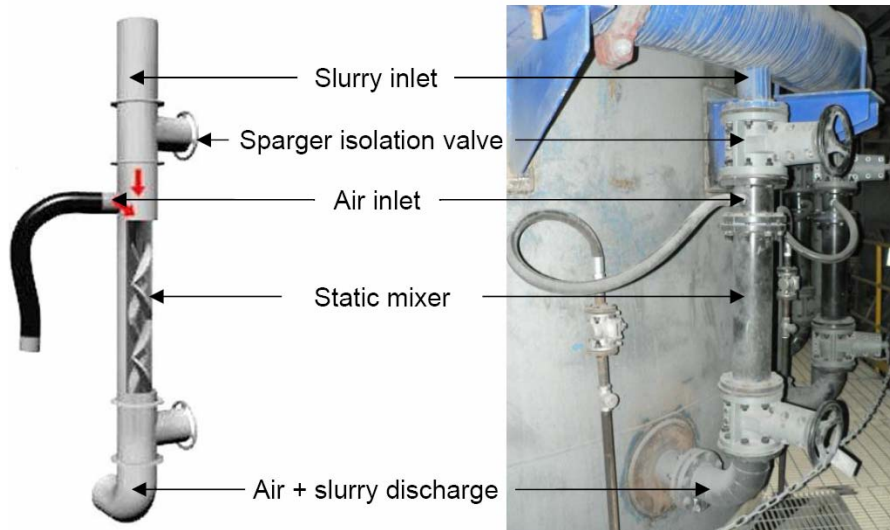
○ حبابساز Minnovex: در این نوع حبابساز، حبابهای ریز هوا در اثر عبور هوای فشرده (بدون آب) از مجرای شبیه به نازل به قطر ۱ اینچ به صورت جتی از هوای پودر شده تشکیل می‌شوند. فشار هوا و قطر مجرا توسط پیچ تنظیم که در بالای حبابساز قرار دارد (Head adjuster) تنظیم می‌شود. بررسیها نشان داده است که قطر مجرای در حدود ۱ mm و فشار هوای بیش از ۴۵ psi منجر به تشکیل جتی از هوا به طول حداقل ۵۰ cm با سرعت ۲۰۰-۴۰۰ m/s خواهد شد. عدم استفاده از آب به منظور تولید حباب باعث کاهش نرخ سایش و تعمیرات و نگهداری این سیستم شده است.



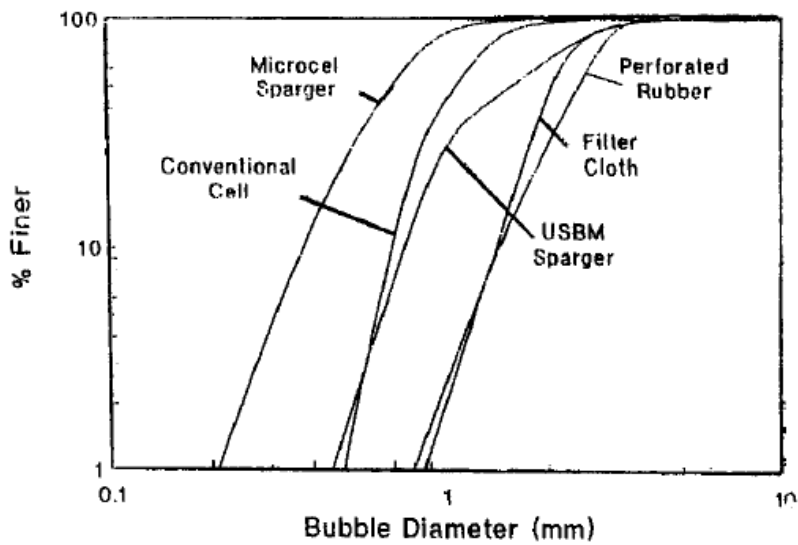


○ حبابساز Microcel: اساس کار حبابسازهای Microcel، اختلاط پالپ با هوا در خارج از ستون است. برای این منظور، بخشی از پالپ باطله ستون به کمک یک پمپ پرستاتیک با جریانی از هوای فشرده مخلوط شده و به درون مخلوط‌کنهای استاتیکی (Static mixer) هدایت می‌شود. حضور تیغه‌هایی تحت عنوان قطعات برش (Shear element) با فواصل مناسب درون مخلوط‌کنها باعث تشکیل حبابهای ریز و یکنواخت می‌شوند که به همراه پالپ وارد سلول می‌شوند. کفساز معمولاً در نقطه خروجی پمپ به جریان اضافه می‌شود.





مقایسه انواع حباسازها از نظر ابعاد حبابهای تولید شده:



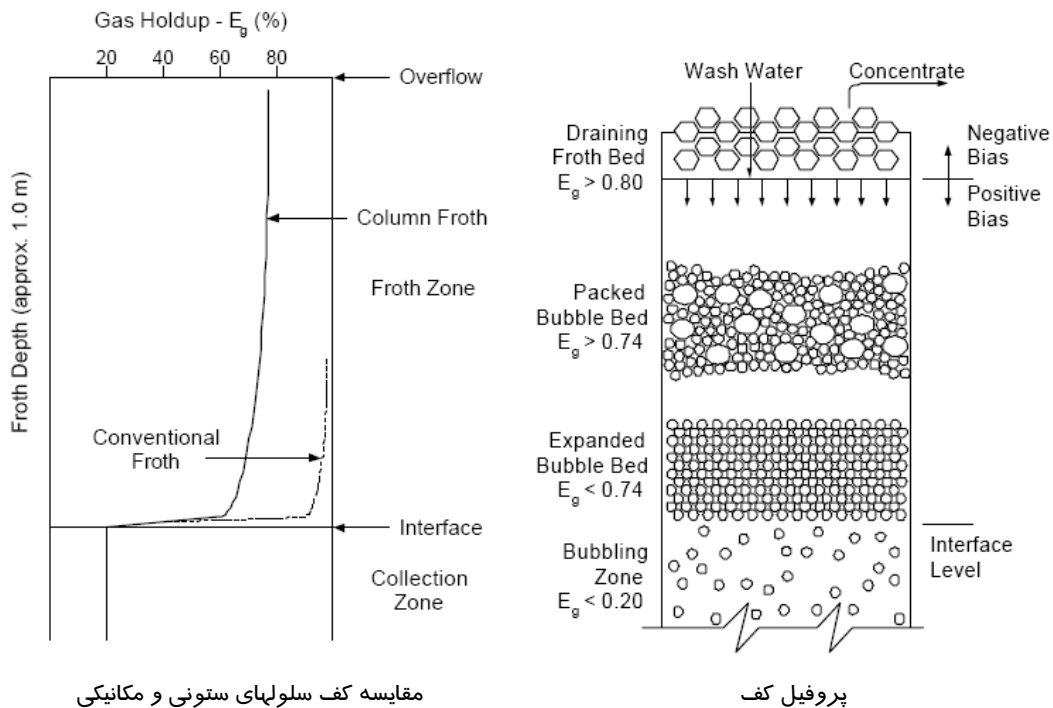
۳-۲-۳- مقایسه کف در سلولهای ستونی و مکانیکی

در ستونها ارتفاع کف بیشتر از سلولهای مکانیکی است.

با افزایش ارتفاع کف:

- کف پایدارتر می‌شود و احتمال جدا شدن ذرات از آن کمتر می‌شود؛ بنابراین، کارایی فرایند بهبود می‌یابد.
- زمان ماند کف افزایش می‌یابد و بنابراین، جدا شدن ذرات بی‌ارزش که در اثر پدیده دنباله‌روی وارد کف شده‌اند جدا می‌شوند.

- به دلیل پایداری کف، امکان شستشوی کف فراهم می‌شود. جریان آب شستشو ذرات باطله آبدوستی که وارد کف شده‌اند را شسته و به پالپ باز می‌گرداند. بنابراین، عیار افزایش می‌یابد. آب شستشو معمولاً با نرخی معادل ۷ متر مکعب بر ساعت به ازای هر متر مربع از سطح مقطع ستون تزریق می‌شود.



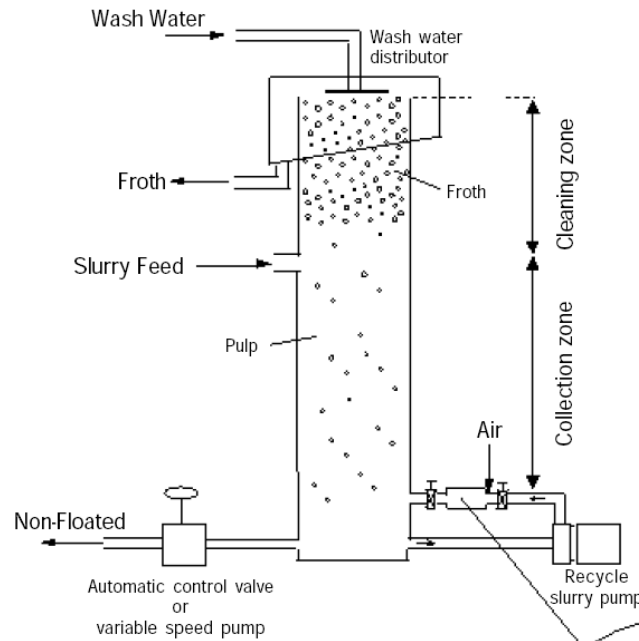
مقایسه کف سلولهای ستونی و مکانیکی

پروفیل کف

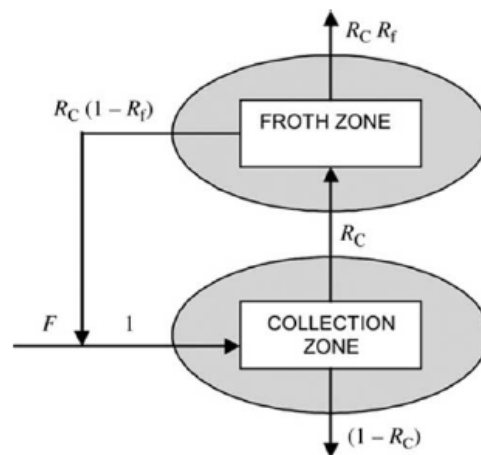
۳-۳-۳- مکانیزم جدایش در سلولهای ستونی

با توجه به عملکرد شستشوی کف در سلولهای ستونی، می‌توان عملکرد کلی ستونها را به دو ناحیه تقسیم کرد:

- منطقه جمع‌آوری (Collecting zone): شامل محدوده بین نقطه هوادهی تا فصل مشترک پالپ و کف (Interface) می‌شود که جمع‌آوری ذرات توسط حبابهای بالارونده صورت می‌گیرد.
- منطقه شستشو یا پرعیارکنی (Cleaning zone): به محدوده کف گفته می‌شود که در آن فرایند جدا شدن ذرات بی‌ارزش و پرعیار شدن محصول کف صورت می‌گیرد.



با توجه به اینکه بر خلاف سلولهای مکانیکی، در سلولهای ستونی تمام ذرات وارد شده به کف بازیابی نمی‌شوند، بنابراین می‌توان فرایند بازیابی ذرات را به صورت زیر نشان داد:



$$R = \frac{R_c R_f}{1 - R_c (1 - R_f)}$$

که R ، R_c و R_f به ترتیب بازیابی کل و بازیابی مناطق جمع‌آوری و پرعیارکنی (کف) است.

بازیابی کف را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$R_f = \frac{M_c}{M_i}$$

$$M_i = B_L \times J_g$$

$$B_L = \frac{K_1 \pi \rho_p d_p}{d_B}$$

M_c : دبی جرمی حدی ذرات با ارزش خارج شده از سلول (t/hm^2)

M_i : دبی جرمی حدی ذرات وارد شده به کف (عبور کرده از فصل مشترک) (t/hm^2)

B_L : میزان بار (ذرات) حباب

J_g : سرعت حدی گاز

K_1 : بخشی از سطح حباب که با یک لایه ذره پوشیده شده است

ρ_p : دانسیته ذره

d_p : قطر ذره

d_B : قطر حباب

با کاهش بازیابی کف، میزان انتخابی بودن فرایند افزایش می‌یابد ولی ظرفیت فرایند کاهش می‌یابد. با افزایش عمق کف، دبی آب و غلظت کف‌ساز، R_f کاهش می‌یابد.

۳-۳-۴- طراحی سلولهای ستونی

طراحی سلولهای ستونی معمولاً با بزرگ مقیاس کردن انجام می‌شود؛ بدین صورت که پارامترهای مورد نظر در مقیاس آزمایشگاهی و سپس نیمه‌صنعتی تخمین زده می‌شوند و سپس با استفاده از ضرایب بزرگ مقیاس کردن به نمونه صنعتی نسبت داده می‌شوند. یکی از رویکردهای مهم در طراحی سلولهای ستونی استفاده از سرعت ظاهری فازها به جای دبی است. سرعت ظاهری هر فاز ($J_i, cm/s$) از تقسیم دبی فاز بر سطح مقطع ستون به دست می‌آید. مقادیر متداول سرعت ظاهری فازها در ستونها عبارت است از:

$$J_T (Tailing) = 0.3 - 1 \text{ cm/s}$$

$$J_g (Air) = 0.5 - 4 \text{ cm/s}$$

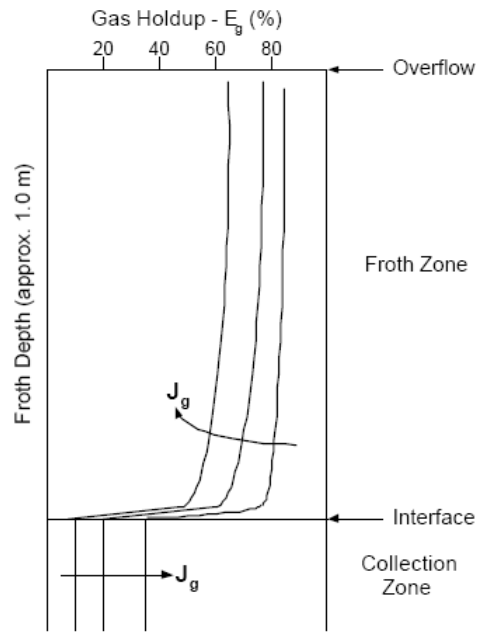
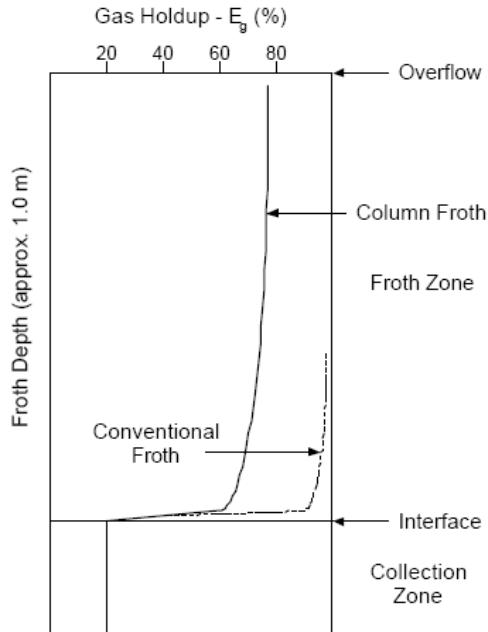
$$J_W (Wash water) = 0.1 - 0.5 \text{ cm/s}$$

$$J_F (Feed) < J_T$$

۳-۳-۵- بررسی عملکرد سلولهای ستونی

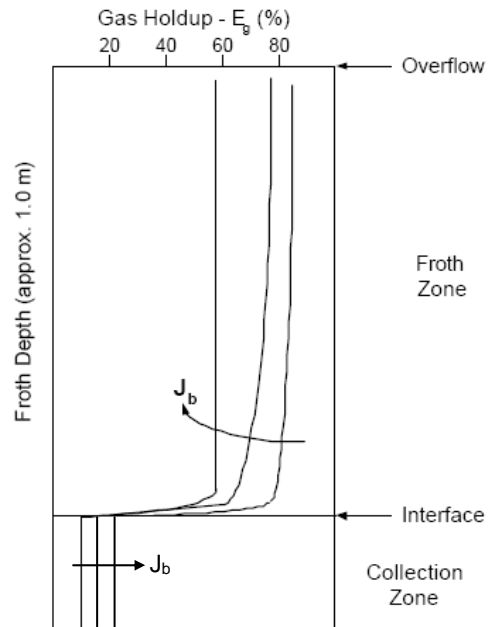
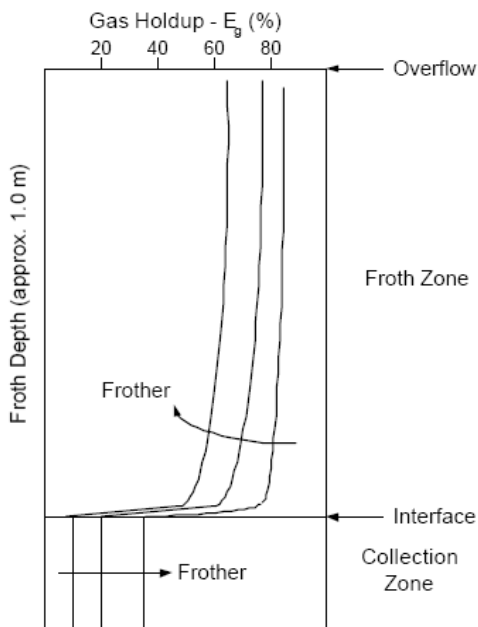
برای بررسی عملکرد ستونها می‌توان از ماندگی گاز (Gas Hold-up) استفاده کرد. ماندگی حجمی فازها (E_i) عبارت است از نسبت حجم فاز به کل حجم ستون.

تأثیر پارامترهای عملیاتی بر ماندگی گاز در سلولهای ستونی (هم در کف و هم در پالپ):



تأثیر ارتفاع کف: با افزایش ارتفاع کف به دلیل افزایش حجم گاز، ماندگی افزایش می‌یابد.

تأثیر سرعت ظاهری گاز: افزایش مقدار گاز ورودی تا زمانی که موجب اغتشاش نگردد مفید است.



تأثیر غلظت کف‌ساز: با افزایش غلظت کف‌ساز، به دلیل کاهش ابعاد و سرعت حبابها، ماندگی افزایش می‌یابد.

تأثیر بایاس: با افزایش بایاس، به دلیل تأخیر در بالا رفتن حبابها، ماندگی گاز افزایش می‌یابد.

بایاس (Bias) بیانگر بزرگی و جهت جریان آب از ناحیه کف به سمت ناحیه جمع‌آوری است. مقدار مثبت بایاس نشان‌دهنده حرکت رو به پایین جریان آب است. بایاس عبارت است از نسبت تفاضل دبی حجمی باطله و خوراک به سطح مقطع ستون.

فصل چهارم

محاسبات متالورژیکی

۴-۱- مقدمه

هر فرایند فرآوری توسط پارامترهایی بر پایه عیار و وزن اجزاء فرایند مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

این پارامترها عبارتند از عیار، بازیابی، نسبت پرعیارشوندگی، نسبت غنی‌شدگی و بازدهی (کارایی) جدایش.

- **عیار (Grade):** عبارت است از مقدار جزء (معمولاً محصول باارزش) در محصول نهایی:

$$\text{عیار (\%)} = \frac{\text{وزن فلز در کنسانتره}}{\text{وزن کنسانتره}} \times 100$$

نکته: در محاسبات، معمولاً مقدار جزئی که کمترین فراوانی را دارد به عنوان عیار در نظر گرفته می‌شود (به عنوان مثال، درصد خاکستر در محاسبات متالورژیکی فرآوری زغال).

- **بازیابی (Recovery):** عبارت است از مقدار (وزنی) جزء در محصول نسبت به مقدار

آن در خوراک فرایند:

$$\text{بازیابی (\%)} = \frac{\text{مقدار جزء در کنسانتره}}{\text{مقدار جزء در خوراک}} \times 100$$

نکته ۱: بازیابی می‌تواند برای فلز باارزش در کنسانتره و یا گانگ در باطله محاسبه گردد.

نکته ۲: در فرآیندهای فرآوری عیار و بازیابی با یکدیگر نسبت عکس دارند.

- **بازدهی (کارایی) جدایش (Separation Efficiency):** در فرایندهای فرآوری، هدف بالا نگهداشتن همزمان بازیابی و عیار است. با توجه به رابطه معکوس این دو پارامتر، ارزیابی دو فرایند نیاز به پارامتری دارد که هر دو را دربر داشته باشد.
- **قانون کلی:** در فرآوری مواد معدنی، محاسبات متالورژیکی با استفاده از مقادیر وزن خوراک و محصولات فرایند و عیار فلز با ارزش در آنها انجام می‌شود. علائم اختصاری این پارامترها عبارتند از: وزن خوراک F ، وزن کنسانتره C ، وزن باطله T ، وزن فلز با ارزش در خوراک f ، در کنسانتره c و در باطله t .
- **روش اول:** محاسبه بازدهی جدایش با استفاده از بازیابی ایده‌آل فلز با ارزش در کنسانتره:

$$S.E. = R_m - R_g$$

R_m برابر است با بازیابی کانی با ارزش به کنسانتره (درصد):

$$R_m = \frac{C}{F} \times \frac{c}{f} \times 100$$

مقدار C به F معمولاً به اختصار C بیان می‌شود:

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

چنانچه حداکثر عیار قابل دستیابی فلز (عیار فرمولی) با m بیان شود، آنگاه:

	فلز (%)	کانی با ارزش (%)
خوراک	m	100
کنسانتره	c	$x = \frac{c}{m} \times 100$

بنابراین:

$$(\%) \text{ گانگ در کنسانتره} = 100 - \frac{c}{m} \times 100 = \frac{100(m-c)}{m}$$

$$(\%) \text{ گانگ در خوراک} = \frac{100(m-f)}{m}$$

در نتیجه:

R_g برابر است با بازیابی گانگ به کنسانتره (درصد):

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

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

با جایگزینی معادلات بازیابی فلز با ارزش و گانگ به کنسانتره در رابطه بازدهی جدایش خواهیم داشت:

$$S.E. = 100C \frac{m(c-f)}{f(m-f)} \quad \blacktriangleleft$$

• **روش دوم:** محاسبه بازدهی جدایش با استفاده از کارایی جدایش فلز با ارزش از خوراک:

$$S.E. = R_c \times R_g$$

$$R_c = \frac{C}{F} \times \frac{c}{f} \times 100$$

$$R_g = \frac{T}{F} \times \frac{100-t}{100-f} \times 100$$

نکته: معادلات جامع موازنه جرم برای فلز با ارزش عبارتند از:

$$F = C + T$$

$$Ff = Cc + Tt$$

با حل معادلات فوق نسبت به عیارها خواهیم داشت:

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

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

با ادغام معادلات فوق خواهیم داشت:

$$S.E. = \left(\frac{C}{F} \cdot \frac{c}{f} \right) \times \left(\frac{T}{F} \cdot \frac{100-t}{100-f} \right) \times 100$$

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

در نتیجه:

$$S.E. = \frac{c(f-t)(c-f)(100-t)}{f(c-t)^2(100-f)} \times 100 \quad \blacktriangleleft$$

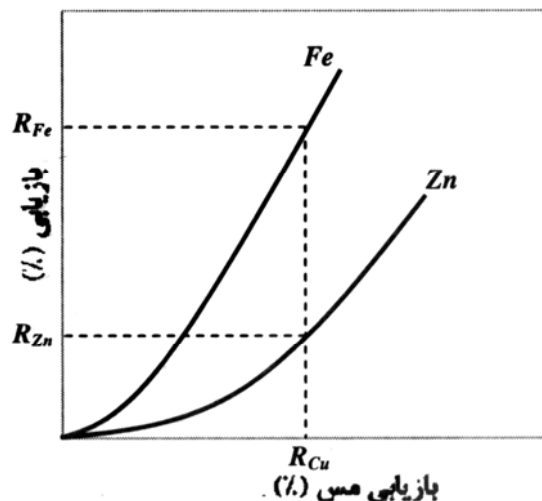
- **راندمان:** راندمان (Yield) عبارت است از نسبت وزن کنسانتره به وزن خوراک. بنابراین، راندمان را می‌توان بازیابی وزنی نامید. راندمان معمولاً در صنایع زغالشویی و سنگ آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$Y = \frac{C}{F} \times 100$$

۲-۴- منحنی‌های تحلیلی

با ادغام پارامترهای متالورژیکی فوق می‌توان منحنی‌هایی را رسم نمود که اطلاعات ارزشمندی را فرایند در اختیار می‌گذارند.

- **منحنی عیار و بازیابی:** با استفاده از این منحنی می‌توان تغییرات عیار و بازیابی را نسبت به یکدیگر بررسی نمود. چنانچه گفته شد، عیار و بازیابی با یکدیگر نسبت عکس دارند.
- **منحنی بازیابی و بازیابی:** می‌توان بازیابی چند عنصر را نسبت به بازیابی یک عنصر خاص رسم نمود. به عنوان مثال در شکل زیر جدایش Cu و Fe به خوبی انجام نمی‌شود زیرا به ازای یک واحد Cu تقریباً یک واحد Fe بازیابی می‌شود. در حالی که جدایش Cu و Zn به خوبی انجام می‌شود زیرا به ازای تقریباً ۶ واحد Cu فقط یک واحد Zn بازیابی می‌شود.

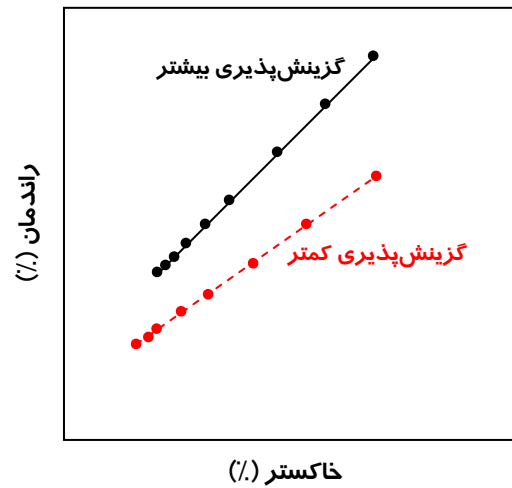


- **منحنی خاکستر و راندمان:** با توجه به اینکه در صنایع زغالشویی به جای عیار زغال از درصد خاکستر استفاده می‌شود، می‌توان با رسم مقادیر راندمان نسبت به خاکستر میزان گزینش‌پذیری فرایندها را با یکدیگر مقایسه نمود.

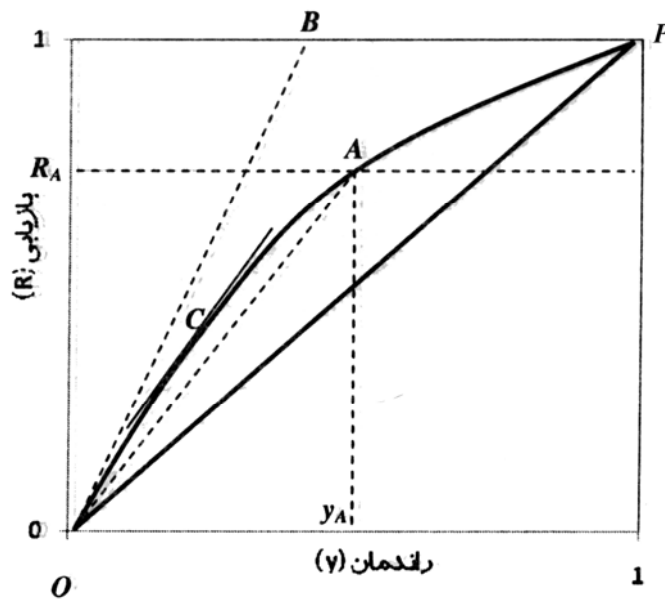
مقدار راندمان زغالشویی را می‌توان به صورت زیر نیز محاسبه نمود:

$$Y = \frac{ash_{Tailing} - ash_{Feed}}{ash_{Tailing} - ash_{Froth}} \times 100$$

در این نمودار، منحنی‌ها به صورت خطوط راستی هستند که تراکم نقاط از ابتدا تا انتهای آن کاهش می‌یابد.



- **منحنی بازیابی و راندمان:** با استفاده از این منحنی می‌توان تغییرات بازیابی نسبت به راندمان، مقادیر عیارها و کارایی جدایش را محاسبه نمود.



با توجه به شکل، اگر A نقطه عملیاتی باشد، OAP منحنی جدایش است:

$$\text{شیب OA} = \frac{\frac{C_A c_A}{Ff}}{\frac{C_A}{F}} = \frac{c_A}{f}$$

در واقع شیب OA، عیار کنسانتره تجمعی نسبت به عیار خوراک است (نسبت غنی‌شدگی). اگر

محور افقی به جای راندمان $\frac{Y}{f}$ باشد، شیب خط عیار کنسانتره خواهد بود.

شیب خط AP نیز نشان‌دهنده عیار باطله می‌باشد:

$$\text{شیب AP} = \frac{1 - \frac{C_A c_A}{Ff}}{1 - \frac{C_A}{F}} = \frac{Ff - C_A c_A}{f(F - C_A)} = \frac{T_A t_A}{f T_A} = \frac{t_A}{f}$$

هر نقطه عملیاتی روی منحنی که به مرکز وصل شود، خواص برداری دارد که مؤلفه افقی آن نشان‌دهنده وزن کنسانتره، شیب خط نشان‌دهنده عیار کنسانتره و مؤلفه عمودی آن نشان‌دهنده بازیابی نقطه خواهد بود.

با توجه به شکل: $\vec{OA} + \vec{AP} = \vec{OP}$. خط OP نمایانگر مکان هندسی نقاطی است که در آن عمل جدایش صورت نمی‌گیرد زیرا شیب خط برابر واحد است:

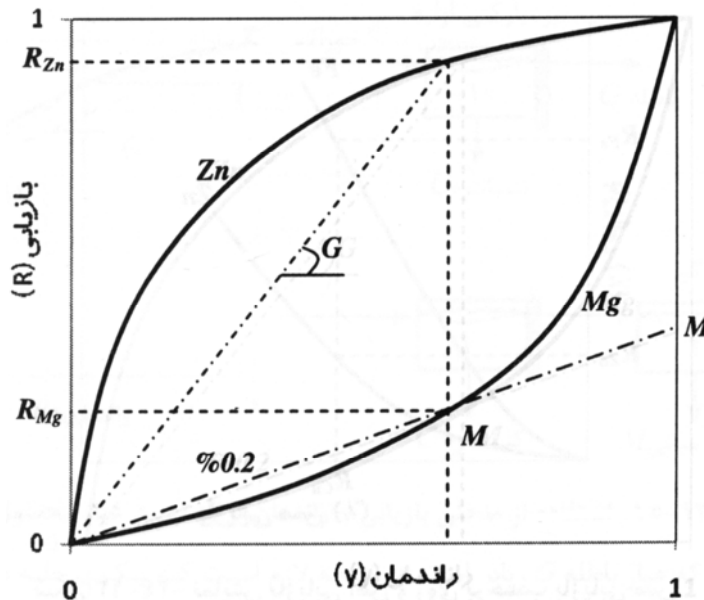
$$\text{شیب OP} = \frac{\frac{C_P c_P}{Ff}}{\frac{C_P}{F}} = 1 \Rightarrow c_P = f$$

به عبارت دیگر، عیار کنسانتره و عیار خوراک یکی است. در عمل سعی بر این است که هر چه بیشتر از این خط فاصله گرفته شود.

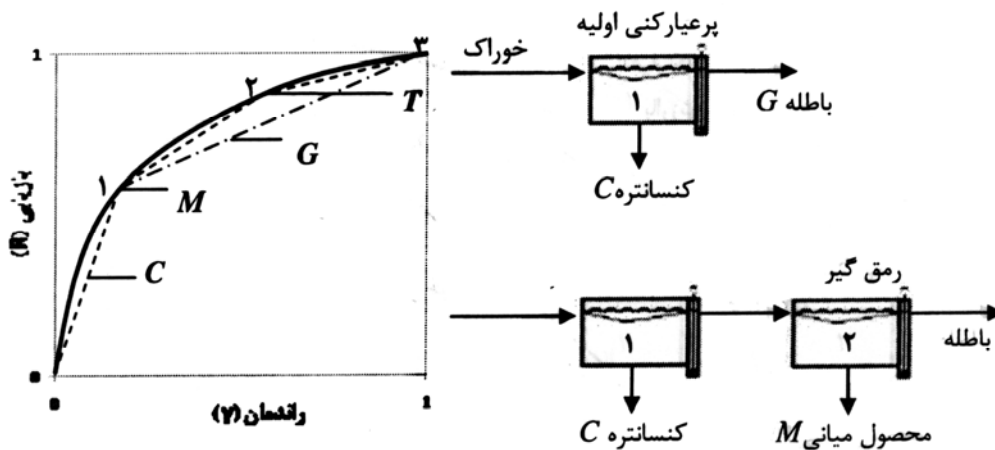
شیب مماس بر منحنی در هر نقطه، عیار لحظه‌ای می‌باشد (به عنوان مثال مماس در نقطه C). شیب مماس بر منحنی در مبدأ نشان‌دهنده عیار کانی خالص است. این مقدار نشان‌دهنده بالاترین عیار قابل دسترسی است.

از منحنی بازیابی - راندمان می‌توان برای نمایش کارایی جدایش همزمان چند عنصر نیز استفاده نمود. در شکل زیر، Zn فلز مورد نظر است و فلز Mg باید از ۲۰٪ بیشتر باشد. R_{Zn} بازیابی Zn برای عیار ۰/۲٪ منیزیم می‌باشد. به عبارت دیگر حداقل بازیابی برای مقدار فلز منیزیم بیش از ۰/۲٪، R_{Zn} می‌باشد.

عیار 0.2% منیزیم از طریق شیب خط OM قابل دستیابی است. عیار کنسانتره Zn در این حالت برابر G است.



مقدار عیار محصول میانی را نیز می‌توان با استفاده از منحنی بازیابی - راندمان محاسبه نمود. به عنوان مثال، مدار ساده زیر (یک مرحله‌ای) را در نظر بگیرید:



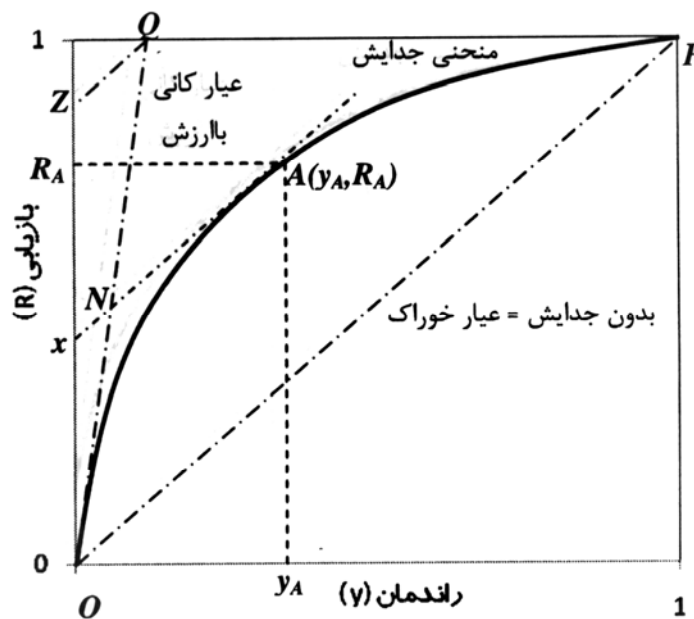
مشاهده می‌شود که عیار باطله G زیاد است. در نتیجه لازم است که یک مرحله دیگر روی باطله پرعیار کنی اولیه، عملیات انجام شود (رمق گیر).

شیب خط ۱-۲ عیار محصول میانی (M)، شیب خط ۲-۳ عیار باطله نهایی (T)، مؤلفه افقی خط ۱-۲ مقدار کنسانتره رمق گیر و مؤلفه عمودی خط ۱-۲ بازیابی ماده باارزش در مرحله رمق گیر را نشان می‌دهد.

با استفاده از منحنی بازیابی - راندمان می‌توان کارایی جدایش (Technical Efficiency) را نیز محاسبه نمود؛ کارایی جدایش عبارت است از:

$$TE = \frac{\text{مقدار ماده‌ای که به صورت کامل جدا شده}}{\text{مقدار ماده‌ای که به طور کامل قابل جدایش می‌باشد}}$$

با توجه به شکل، شیب مماس بر منحنی از مبدأ (OQ) عیار کانی باارزش خالص (m) می‌باشد. منحنی جدایش کامل، OQP است. OQ نشان‌دهنده بازیابی ۱۰۰ درصدی کانی باارزش با عیار m و عیار باطله صفر می‌باشد.



اگر از نقطه A خطی موازی خط OP رسم شود، محور عمودی را در نقطه x و خط جدایش کامل (OQ) را در نقطه N قطع می‌کند؛ در نتیجه:

$$TE = \frac{ON}{OQ}$$

هر نقطه روی منحنی عملیاتی را می‌توان حاصل دو نوع عملیات فرض کرد. یکی حد معینی از

جدایش کامل و دیگری عملیات بدون هیچ گونه جدایش:

$$OA = \underbrace{ON}_{\text{مؤلفه جدایش کامل}} + \underbrace{NA}_{\text{مؤلفه بدون جدایش}}$$

از نقطه Q خطی موازی خط OP رسم می‌شود تا محور عمودی را در نقطه Z قطع کند.

از تشابه دو مثلث OZQ و OXN می‌توان نوشت:

$$\frac{ON}{OQ} = \frac{OX}{OZ}$$

$$\text{شیب } xA = \frac{R_A - x}{Y_A} = 1 \longrightarrow x = R_A - Y_A$$

$$\text{شیب } ZQ = \frac{1 - z}{Y_Q} = 1 \longrightarrow z = 1 - Y_Q$$

$$\text{شیب } OQ = \frac{1}{Y_Q} = \frac{m}{f} \longrightarrow Y_Q = \frac{f}{m}$$

و یا بطور کلی:

$$\frac{OX}{OZ} = \frac{R_A - Y_A}{1 - \frac{f}{m}}$$

$$TE = \frac{R - Y}{1 - \frac{f}{m}}$$

از طرفی:

$$R = \frac{c(f-t)}{f(c-t)}, \quad Y = \frac{C}{F} = \frac{f-t}{c-t}$$

در نتیجه:

$$TE = \frac{m(f-t)(c-f)}{f(m-f)(c-t)}$$

۳-۴- محاسبه بازیابی کلی مدارهای فلوتاسیون

برای محاسبه بازیابی کلی یک مدار می‌توان به صورت مرحله به مرحله بازیابی هر بخش مدار را

محاسبه و بازیابی کل را با استفاده از آن محاسبه نمود.

از این روش برای موازنه جرم مدار نیز می‌توان استفاده نمود.

به عنوان مثال، اگر در مدار فلوتاسیون زیر بازیابی مرحله اول ۹۰٪، مرحله دوم ۷۵٪ و مرحله سوم ۵۰٪ باشد، بازیابی کلی مدار را محاسبه کنید.

