



# کنترل و مدلسازی سیستم های کانه آرای

جلسه دهم

مهدی نصیری سروی  
دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان  
۱۳۹۷



## مدلسازی فلوتاسیون



مدلسازی فلوتاسیون کاربرد محدودتری دارد، دلیل؟  
به دلیل پیچیدگی بیش از حد فرآیند فلوتاسیون و جامعیت نداشتن روش های مدلسازی در  
درنظر گرفتن تمامی پارامتر های تاثیر گذار.  
بیشترین کاربرد مدلسازی فلوتاسیون در بحث آموزش است.  
پارامترهای تاثیر گذار در فرآیند فلوتاسیون بسیار زیادند مانند مشخصات کانی و گانگ، مشخصات  
دستگاه فلوتاسیون، شرایط متفاوت محیط شیمیایی فلوتاسیون و عوامل عملیاتی.



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن



### Chemistry Components:

- Collectors
- Frothers
- Activators
- Depressants
- pH

## Flotation system

### Operation Components:

- Feed Rate
- Mineralogy
- Particle Size
- Pulp Density
- Temperature

### Equipment Components:

- Cell Design
- Agitation
- Air Flow
- Cell Bank Configuration
- Cell Bank Control



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن



برای مدلسازی فلوتاسیون بایستی فرمول بندی بر حسب نرخ فلوتاسیون انجام شود.  
اما نرخ فلوتاسیون چیست؟

فلوتاسیون تشکیل شده است از تعداد زیادی واکنش شیمیایی که نرخ فلوتاسیون ترکیبی از نرخ های متعدد واکنش های تشکیل دهنده فلوتاسیون است. مجموعه موفق این واکنش ها فرآیند فلوتاسیون را تشکیل میدهند و این واکنش ها (زیر واکنش ها و یا زیر فرآیند ها) به صورت زیر دسته بندی می شوند:

1. The particle must achieve a level of hydrophobicity that will permit it to attach to a rising bubble.
2. The particle must be suspended in the pulp phase of the cell.
3. The particle must collide with a rising bubble.
4. The particle must adhere to the bubble.
5. The particle must not detach from the bubble during passage through the pulp phase.
6. The particle must not detach from the bubble as the bubble leaves the pulp phase and enters the froth phase.
7. The particle must not detach and drain from the froth during the passage of the froth to the weir.



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن



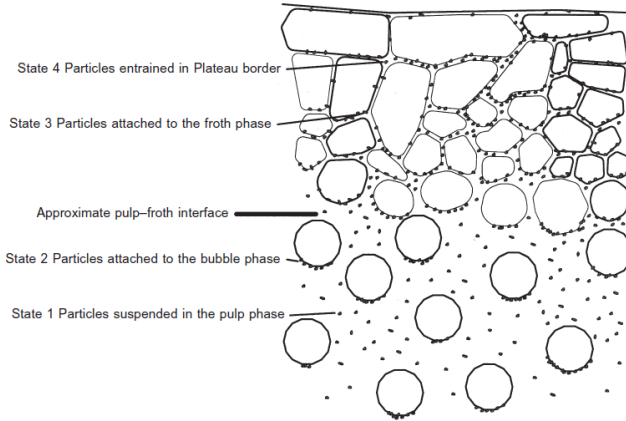
برای مدلسازی موفق یک فرآیند فلوتاسیون و استنتاج یک رابطه سینتیکی بایستی فاز کف و فاز پالپ جداگانه مورد بررسی قرار گیرد، دلیل این امر؟

به دلیل اینکه سینتیک فاز کف و فاز پالپ متفاوت است.

برای این هدف موقعیت ذره در فرآیند فلوتاسیون بایستی بررسی شود، ذره در یک فرآیند فلوتاسیون ممکن است در ۴

موقعیت درون

سلول باشد:



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن



سه نرخ انتقال وجود دارد:

۱- انتقال مواد از پالپ به کف:

$M_s$ : جرم کانی در پالپ

$k$ : ثابت نرخ فلوتاسیون

$$\frac{dM_s}{dt} = -kM_s$$

۲- انتقال مواد از کف به کنسانتره

$M_f$ : جرم کانی در کف

$k'$ : ثابت نرخ انتقال کف

$$\frac{dM_f}{dt} = -k'M_f$$

۳- برگشت مواد از کف به پالپ

$k''$ : ثابت نرخ برگشت مواد

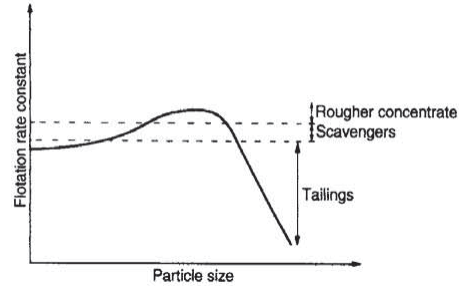
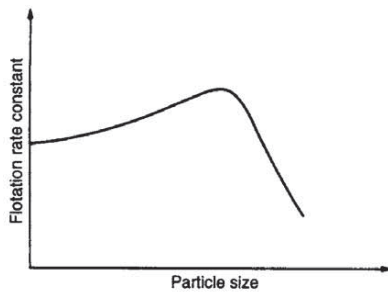
$$\frac{dM_f}{dt} = -k''M_f$$



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن



مشکل وجود ذرات با ثابت نرخ فلوتاسیون مختلف است:



دلیل پایین بودن نرخ ثابت فلوتاسیون در ذرات کوچک؟

دنباله روی از جریان سیال و پایین بودن احتمال برخورد با حباب هوا در مورد گانگ اما این دنباله روی باعث کاهش عیار می شود.

دلیل پایین بودن نرخ ثابت فلوتاسیون ذرات درشت؟

کم بودن زمان تماس ذرات با حباب هوا (زمان سر خوردن) و کاهش احتمال اتصال به حباب



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن



## فلوتاسیون بدون تاثیر کف

تنها اندازه کانی ها باعث متفاوت شدن نرخ ثابت فلوتاسیون نمی شود، عوامل موثر دیگر؟

ترکیب شیمیایی متفاوت و میزان اکسیداسیون کانی

بنابراین برای دست یابی به یک مدل سازی نسبتاً جامع تر روش هایی با فرض های ساده سازی شده به کار می رود.

**اگر سینتیک فلوتاسیون بدون تاثیر کف (فلوتاسیون ناپیوسته) در نظر گرفته شود:**

در این حالت فرض می شود که ذرات به محض رسیدن به کف به کنسانتره وارد می شوند:

$$\frac{dM_s}{dt} = -kM_s \rightarrow \frac{dM_s}{M_s} = -kdt \rightarrow M_s = M_{s0}\exp(-kt)$$

$$M_s(i, t) = M_s(i, 0)\exp(-k(i)t)$$

نشان دهنده نوع ذره شناور شده است.



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن

## فلوتاسیون بدون تاثیر کف



- اما مکانیزم های اصلی در فلوتاسیون را می توان به دو دسته تقسیم کرد:
- ۱- فلوتاسیون واقعی
  - ۲- دنباله روی ذرات
- بنابراین در عمل فلوتاسیون ترکیبی از فلوتاسیون واقعی و دنباله روی ذرات است. پارامتر های تاثیر گذار در این دو پدیده چیست؟
- یک بار دیگر: شیمی سطح ذرات، میزان اکسیداسیون و اندازه ذرات در مورد اندازه ذرات تاثیر آن بر دو مکانیزم به چه صورت است (نمودار)؟
- در مورد ذراتی با اندازه یکسان می توان نوشت (سینتیک درجه اول است):

$$R(t) = 1 - \exp(-kt)$$

اما در اندازه ذرات مختلف ثابت نرخ فلوتاسیون متفاوت است. پس در یک فرض می توان ذرات را به ذرات با شناوری سریع با نسبت  $c$  و ثابت نرخ  $k_f$  و ذرات با شناوری آهسته با نسبت  $d$  و ثابت نرخ  $k_s$  تقسیم کرد

$$R(t) = c[1 - \exp(-k_f t)] + d[1 - \exp(-k_s t)]$$



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن

## فلوتاسیون بدون تاثیر کف



- اما این راه حل کاملی نیست هر چند می توان ضرائب مختلف در این رابطه را از روی نتایج آزمایش ها به دست آورد.
- راه حل کلی تقسیم خوراک به دامنه های مختلف با ثابت نرخ فلوتاسیون ثابت است:

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(k)[1 - \exp(-kt)]dk$$

$f(k)$ : تابع چگالی بیان کننده ثابت نرخ فلوتاسیون



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن

## فلوتاسیون با تاثیر کف



در این شرایط که تاثیر کف در سینتیک در نظر گرفته می شود یک حالت ساده کننده این است که فرض شود مواد از کف به پالپ باز نمی گردند:

$$M_s(t) = M_s(0)\exp(-kt)$$

در مورد پالپ:

$$\frac{dM_f}{dt} = -\frac{dM_s}{dt} - k'M_f$$

انتقال جرم در محیط کف:

$$\rightarrow M_f = \frac{k}{k' - k} (\exp(-kt) - \exp(-k't))$$

$$M_f + M_s = \exp(-kt) + \frac{k}{k' - k} (\exp(-kt) - \exp(-k't))$$

و به صورت کلی:

اگر کف به سرعت برداشته شود نسبت  $k$  و  $k'$  به چه صورت می شود؟

$$k' \gg \gg k$$

$$M_f + M_s = \frac{k'}{k' - k} \exp(-kt)$$

بنابراین:



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن

## فلوتاسیون با تاثیر کف



اما اگر مواد از کف به پالپ باز گردند:

$$\frac{dM_s}{dt} = -kM_s + k''M_f$$

و نیز:

$$\frac{dM_f}{dt} = kM_s - (k' + k'')M_f$$

$$\rightarrow M_s + M_f = \frac{1}{A' - B'} (A' \exp(B't) - B' \exp(A't))$$

که در این معادله  $A'$  و  $B'$  ریشه های معادله زیر هستند:

$$r^2 + (k + k' + k'')r + (k \times k') = 0$$

به دست آوردن پارامترهای مذکور از داده های آزمایشگاهی کار ساده ای نیست.

اما مطالب گفته شده برای سیستم های ناپیوسته است. در مورد سیستم های پیوسته چه اتفاقی می افتد؟





مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن

## فلوتاسیون در سیستم های پیوسته



در صورتی که تاثیر کف نادیده گرفته شود و سینتیک مرتبه اول:  
بازیابی از روشی که قبلاً برای سیستم پیوسته مرتبه یک گفته شد به دست می آید.

آیا ثابت نرخ فلوتاسیون در سیستم پیوسته برای همه مواد داخل سلول مشابه است؟  
خیر، مجدداً شیمی سطح، میزان اکسیداسیون و مهمتر از همه اندازه ذرات نقش بسیار مهمی دارند.

پس چه می توان کرد برای به دست آوردن بازیابی؟

$$R = \int_{k=0}^{\infty} \int_{t=0}^{\infty} f(t)f'(k)(1 - \exp(-kt))dt dk$$



مهدی نصیری سروی  
استادیار گروه فراوری مواد معدنی  
دانشکده معدن

## فلوتاسیون در سیستم های پیوسته



سینتیک فلوتاسیون پیوسته با تاثیر کف:

آیا بازگشت ذرات از کف به پالپ مهم است که بتوان در مدلسازی آنرا دخیل کرد؟

در مقیاس صنعتی بازگشت ذرات از کف به پالپ ممکن است به ۹۰ درصد هم برسد. بنابراین  
بایستی همواره این پارامتر را در مدلسازی در نظر گرفت.

بالابودن نرخ برگشت ذرات از کف به پالپ آیا نشانه نا کارآمدی سیستم فلوتاسیون و کم بودن  
بازیابی است؟

خیر، مواد تا رسیدن به کنسانتره بایستی چندین بار شسته شوند.

می توان بازیابی منطقه کف را به صورت زیر تعریف کرد:

$$R_f = \frac{k'M_f}{(k' + k'')M_f} = \frac{k'}{(k' + k'')}$$

و بازیابی کلی برابر خواهد بود با:

$$R = \frac{R_f k \tau}{R_f k \tau + 1}$$

بحث دنباله روی در سیستم های پیوسته به چه صورتی مطرح می شود؟

معمولاً به صورت فلوتاسیون واقعی با نرخ ثابت کم مدلسازی می شود گرچه این روش کاملاً  
صحیح نیست.