

# تعیین ظرفیت حمل جامد و ثابت سنتیکی درجه اول برای مولیدنیت با استفاده از ستون فلوتاسیون پایلوت در کارخانه آزمایشی تغلیظ

## مجتمع مس سرچشمه

سید مصطفی وزیری

دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد کلاهدوزان

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد رضا یاراحمدی

کارشناس فرآوری - مجتمع مس سرچشمه

(تاریخ دریافت ۸۱/۹/۲۷، تاریخ تصویب ۸۲/۹/۱۸)

### چکیده

برای تعیین نرخ حمل جامد و ثابت سنتیکی در ستونهای فلوتاسیون<sup>۱</sup> مدل‌های مختلفی توسط محققین ارائه شده است. هر کدام از این مدل‌ها تحت شرایط خاصی صحت پیدا می‌کند و نمی‌توان برای آنها عمومیت در نظر گرفت. این مسئله در مورد مدل‌های تجربی اهمیت بیشتری دارد. معضل دیگری که در مورد مدل‌های تجربی مطرح می‌باشد، تفاوت زیاد آنها با مقادیری است که از راه آزمایش حاصل می‌شود. بنابراین برای بزرگ مقیاس کردن<sup>۲</sup> ستونهای فلوتاسیون که ثابت سنتیکی و ظرفیت حمل پارامترهای اصلی هستند، برآورد این مقادیر از طریق آزمایش ضروری خواهد بود. در کارخانه آزمایشی تغلیظ مس سرچشمه برای بزرگ مقیاس نمودن ستون فلوتاسیون نیمه صنعتی و طراحی ستون صنعتی برای مرحله شستشو در کارخانه فرآوری مولیدنیت، نرخ حمل و ثابت سنتیکی از طریق آزمایشهای خاصی اندازه گیری شده است. مقدار ظرفیت حمل حاصله از آزمایشها با مقادیر بدست آمده از مدل‌ها، یکسان نیست و برای تفاوت دو مقدار، دلایلی ارائه گردیده است.

**واژه های کلیدی:** ستون فلوتاسیون، ثابت سنتیکی جمع آوری، ظرفیت حمل، بزرگ مقیاس نمایی

### مقدمه

در این مقاله دو پارامتر ظرفیت حمل و ثابت سینتیکی که در روند طراحی سلولهای صنعتی مورد توجه قرار دارند بررسی می‌گردد. برای بررسی نرخ فلوتاسیون<sup>۳</sup> از یک تابع سنتیکی درجه اول استفاده می‌شود. بین منظور اگر غلظت اولیه ذرات قابل فلوته شونده  $C_0$  باشد، غلظت این ذرات در زمان  $t$  به صورت زیر خواهد بود [۵]:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-kt}$$

(۱)

$k$  ثابت سنتیکی فرآیند فلوتاسیون است که از طریق آزمایشهای خاصی اندازه گیری می‌شود. با استفاده از رابطه فوق، بازیابی عملیات فلوتاسیون به صورت زیر خواهد بود:

استفاده از ستونهای فلوتاسیون بدلیل دارا بودن خواص ویژه در پرعیار سازی کانیها در مرحله شستشو طی دو دهه اخیر بخصوص برای کانیهای مس و مولیدن گسترش فراوانی یافته است. صرفه جویی در سطح زیر بنا، عدم نیاز به تجهیزات مکانیکی و امکان استفاده از آب شستشو جهت حذف ذرات ناخواسته وارد شده به کف از جمله مشخصات منحصر به فرد سلولهای ستونی است. علیرغم همه این مزایا نیاز به کنترل دقیق، تخصص پرسنل و بالاخص مشکلاتی که در تعمیم اطلاعات بدست آمده در مرحله آزمایشگاهی به مرحله طراحی صنعتی در این رابطه وجود دارد روند فراگیر شدن این روش را کند نموده است.

که در آن  $j_g$  سرعت ظاهری گاز،  $d_{bo}$  قطر متوسط حبابها در بالاترین نقطه ستون،  $d_p$  و  $\rho_p$  بترتیب قطر و چگالی ذرات و  $K_1$  کسری از سطح حباب است که توسط ذرات جامد پوشیده شده است [۱].

رابطه فوق بر اساس آنالیز ابعادی حاصل شده است [۲]. بررسی ها و آزمایشات مختلف برای تعیین ضریب ثابت  $K_1$  نشان داده اند که حداکثر این مقدار حدود ۰/۵ است [۲]. مدل دیگری که برای تعیین ظرفیت حمل ارائه شده به صورت کاملاً تجربی، بر اساس داده های ستونهای فلوتاسیون در معادن مختلف، تعیین شده که به صورت زیر است [۳]:

$$Ca = 0.05 d_{80} \rho_p \quad (7)$$

در اینجا  $d_{80}$  قطر دهانه سرندي است که هشتاد درصد ذرات از آن می گذرند و بر حسب میکرون بیان می شود. چگالی ذرات نیز بر حسب  $g/cm^3$  بیان می گردد. از مقایسه دو رابطه (۶) و (۷) می توان نتیجه گرفت که در رابطه (۷) ضریب عددی نمی تواند ثابت باشد، چون این ضریب در حقیقت تابعی از سرعت ظاهری گاز، قطر حباب و ضریب ثابت  $K_1$  می باشد. این مدل منحصر در محدوده چگالی پالپ معادل  $\rho_p \geq 4gr/cm^3$  و سرعت ظاهری گاز معادل  $j_g \geq 1.5cm/s$  صحت دارد [۲]. با وجود مدل های مختلفی که برای تعیین ظرفیت حمل جامد وجود دارد، برای طراحی و بزرگ مقیاس نمایی ستونهای فلوتاسیون مقدار ظرفیت حمل جامد را باید از طریق آزمایش بدست آورد. این مسئله به دلیل اهمیت این پارامتر در کارایی ستونهای فلوتاسیون می باشد.

### روش تحقیق و مواد

کلیه آزمایشها در یک ستون فلوتاسیون نیمه صنعتی به قطر ۲۶ سانتیمتر و ارتفاع ۴/۸ متر انجام شده اند. اندازه گیری عمق کف در این ستون بر اساس تفاوت هدایت الکتریکی پالپ و کف، با استفاده از یک سیستم کنترلی اتوماتیک صورت می گیرد. برای اندازه گیری میزان دبی های پالپ و آب شستشو نیز از فلومترهای مربوطه استفاده می شود. شمای کلی این ستون در شکل (۱) نشان داده شده است. برای تعیین ظرفیت حمل و ثابت

$$R = 1 - e^{-kt} \quad (2)$$

در فلوتاسیون ستونی برای بازیابی آزمایشهای ناپیوسته از رابطه زیر استفاده می شود:

$$R_{fc} = R_{\infty} \times (1 - \exp(-k_{fc}t)) \quad (3)$$

که در آن  $R_{\infty}$  حداکثر بازیابی است که در زمانهای طولانی بدست می آید.  $R_{fc}$  بازیابی کلی ستون است که در حقیقت برآیند بازیابی های دو زون کف ( $R_f$ ) و جمع آوری ( $R_c$ ) در ستون فلوتاسیون می باشد.

$k_{fc}$  ثابت سینتیکی کلی ستون است. ثابت سینتیکی زون جمع آوری ( $k_c$ ) بر اساس مدل زیر تخمین زده می شود:

$$k_{fc} = k_c \times R_f \quad (4)$$

مدل تئوری ارائه شده برای ثابت سینتیکی جمع آوری در ستونهای فلوتاسیون به صورت زیر است:

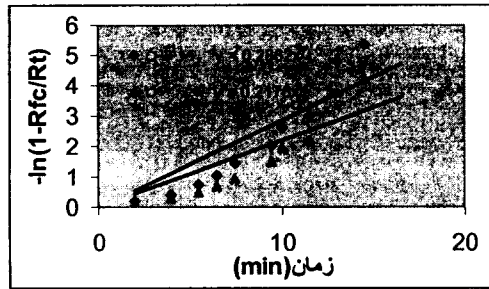
$$k_c = \frac{1.5 J_g E_K}{d_b} \quad (5)$$

که در آن  $E_K$  کارایی جمع آوری می باشد. در عمل ثابت سینتیکی باید با روشهای آزمایشگاهی تخمین زده شود.

میزان نرخ حمل جامد توسط حبابها و انتقال آنها به بخش کنسانتره ستونهای فلوتاسیون، غالباً تابع شرایط عملیاتی ستون است. این شرایط شامل نرخ گازدهی، قطر حبابها، اندازه و چگالی ذرات و غلظت مواد شیمیایی افزودنی می باشند. نرخ حمل جامد توسط مدل های مختلفی بیان شده است. در همه این مدلها نرخ حمل بر حسب  $g/cm^2 \cdot min$  بیان می گردد. حداکثر میزان نرخ حمل جامد در ستونها، ظرفیت حمل جامد<sup>۶</sup> نامیده می شود. ظرفیت حمل جامد را می توان با رابطه زیر نشان داد [۲]:

$$Ca = K_1 \frac{\pi d_p \rho_p j_g}{d_{bo}} \quad (6)$$

ترسیم نمودار  $-\ln(1 - \frac{R}{R_\infty})$  بر حسب زمان، شیب خط که همان ثابت سینتیکی است، محاسبه می گردد. در شکل (۲) این نمودار برای آزمایش S-12 نشان داده شده است. در این آزمایش بازیابی نهایی برای مولیدن و مس به ترتیب ۹۶٪ و ۸٪ بوده است. در مجموع هفت آزمایش مختلف برای تعیین تأثیر پارمترهای مختلف بر روی ثابت سینتیکی انجام گرفته است. نتایج کلی این آزمایشها در جدول (۱) نشان داده شده است.



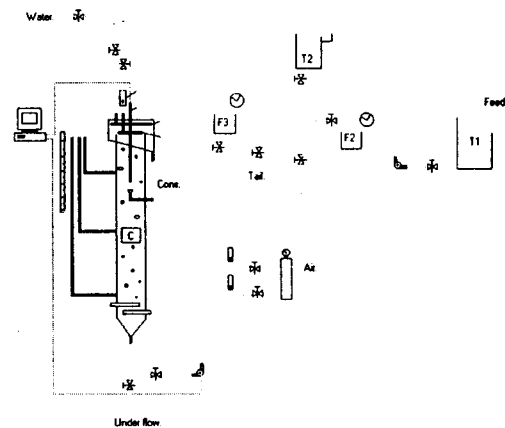
شکل ۲: نمودار تعیین ثابت سینتیکی برای مس و مولیدن در آزمایش S-12.

همانطوریکه در جدول (۱) مشاهده می شود، با افزایش سرعت ظاهری گاز ثابت سینتیکی افزایش می یابد. با افزایش میزان سولفور سدیم به عنوان بازدارنده مس، ثابت سینتیکی مس به طور قابل توجهی کاهش می یابد. نیز حذف زون کف باعث افزایش ثابت سینتیکی شده است. چون در این حالت بازیابی کلی افزایش یافته است. ثابت سینتیکی حاصله در این آزمایش مختص زون جمع آوری است و با توجه به رابطه (۴)، میزان بازیابی زون کف ۶۸٪ بدست می آید. با افزایش سرعت ظاهری آب بایاس<sup>۷</sup> به دلیل افزایش میزان شستشوی کف و کاهش بازیابی کلی، ثابت سینتیکی کاهش پیدا کرده است. استفاده از حبابسازهای دو لایه نیز باعث کاهش ثابت سینتیکی شده است. شرایط استاندارد در آزمایشهای مشابه شرایط اعمال شده در آزمایش S-12 هستند و ثابت های سینتیکی حاصله برای مولیدن و مس در این آزمایش می توانند برای بزرگ مقیاس نمایی ستون فلوتاسیون مورد استفاده قرار گیرند.

روش عملی تخمین ظرفیت حمل جامد در فلوتاسیون ستونی، تغییر نرخ جامد خوراک و تعیین نرخ حمل جامد

سنتیکی، نمونه هایی به صورت پالپ از محل ورودی کلینرهای پنجم، ششم و هفتم کارخانه فرآوری مولیدنیت که برای ستون فلوتاسیون صنعتی در نظر گرفته شده، تهیه گردید. این نمونه ها پس از انتقال به کارخانه پایلوت، در ستون فلوتاسیون نیمه صنعتی مورد آزمایش قرار گرفت.

برای تخمین ثابت سینتیکی با استفاده از آزمایشهای ناپیوسته میزان بازیابی کلی فلوتاسیون در زمان های مختلف تعیین می شود. برای



شکل ۱: شمای کلی ستون فلوتاسیون مورد استفاده.

این منظور ابتدا ستون با پالپ مورد نظر پر می گردد و سپس ستون تحت هوادهی قرار می گیرد. به طور همزمان آب شستشو نیز وارد و کنسانتره ستون در زمانهای معین به طور جداگانه جمع آوری می شود. پس از فیلتراسیون و خشک کردن کنسانتره های حاصله، عیار مولیدن و مس در آنها با آنالیز شیمیایی تعیین می گردد، برای اینکه موازنه جرم برقرار باشد، با استفاده از فرمول لاگرانژ تمامی عیارها تصحیح می شوند. بازیابی کلی فلوتاسیون با استفاده از رابطه (۸) تعیین می گردد:

$$R_{fc} = \frac{C.c}{F.f} \quad (8)$$

$C, c$  بترتیب وزن و عیار کنسانتره و  $F, f$  وزن و عیار خوراک هستند. بدین ترتیب با تجمعی کردن بازیابی های حاصله، میزان بازیابی حداکثر بدست می آید و با

جدول ۱: شرایط عملیاتی اعمال شده در آزمایشهای سینتیکی و نتایج آنها.

نام تست	$J_g$ (cm/s)	$\varepsilon_g$ (%)	$J_B$ (cm/s)	عمق کف (cm)	غلظت سولفور (%)	$k_{fc}$ مس	$k_{fc}$ مولیبدن
S-11	۰/۶۳	۲/۸	۰/۱	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۱۸۱	۰/۲۴۷
S-12	۱/۲۶	۵/۵	۰/۱	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۲۱۸	۰/۲۸۶
S-13	۱/۸۸	۷/۸	۰/۱	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۲۴۹	۰/۳۱۵
S-14	۱/۲۶	۵/۵	۰/۱	۱۰۰	۰/۵	۰/۱۵۷	۰/۲۵۸
S-15	۱/۲۶	۴/۶	۰/۱	۰	۰/۲۵	۰/۲۲۲	۰/۴۲۱
S-16	۱/۲۶	۷/۳	۰/۱	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۱۶۶	۰/۲۳۴
S-1	۱/۲۶	۵/۵	۰/۲۲	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۱۰۷	۰/۲۷۱

جدول ۲: میزان نرخ حمل جامد در مقابل نرخ جامد خوراک در عمق کف ۱۰۰ سانتیمتر.

نرخ جامد خوراک (gr/min)	نمونه اول (gr/min)	نمونه دوم (gr/min)	نمونه سوم (gr/min)	میانگین نرخ حمل جامد (gr/min)
۲۹۸۴	۱۰۱۴	۱۱۳۱	۹۰۳	۱۰۱۶
۲۶۱۹	۱۳۹۸	۹۶۰	۷۹۲	۱۰۵۰
۲۱۱۱	۱۱۷۶	۱۲۹۰	۸۴۶	۱۱۰۴
۱۹۲۲	۸۳۴	۱۱۳۲	۱۰۳۴	۱۰۰۰
۱۷۶۶	۶۴۴	۷۶۴	۵۹۲	۶۶۷

آزمایشها در دو عمق کف ۱۰۰ و ۴۰ سانتیمتری انجام شده اند. کاهش درصد جامد خوراک با افزودن آب به آن و افزایش درصد جامد با ته نشین کردن ذرات جامد و برداشتن آب از روی پالپ صورت گرفته است. بدلیل کم بودن مقدار نمونه، برای پایدار کردن عملکرد ستون با جمع کردن باطله و کنسانتره در داخل مخزن خوراک دهی و وارد کردن مجدد آنها به ستون، زمان لازم برای رسیدن بحالت پایدار<sup>۸</sup> به ستون داده شده است. این کار قبل از باز کردن آب بایاس و آب لاوکی صورت می گیرد.

برای افزایش دقت کار، در هر آزمایش سه نمونه از کنسانتره در زمانهای مشخص گرفته شده است تا میانگین آنها به عنوان نرخ حمل منظور گردد. بعد از اتمام تستها نمونه های گرفته شده فیلتر و خشک شده اند تا جامد بدون رطوبت حاصل گردد. سپس نمونه ها توزین شده و با در نظرگرفتن زمان گرفته شدن نمونه ها، نرخ حمل جامد محاسبه گشته است. نتایج حاصل از آزمایشها برای عمق کف معادل ۱۰۰ سانتیمتر به صورت جدول (۲) می باشد.

برای تعیین ظرفیت حمل جامد، نمودار نرخ حمل جامد بر حسب نرخ جامد خوراک برای دو عمق کف مذکور، به

به ازای آن می باشد.

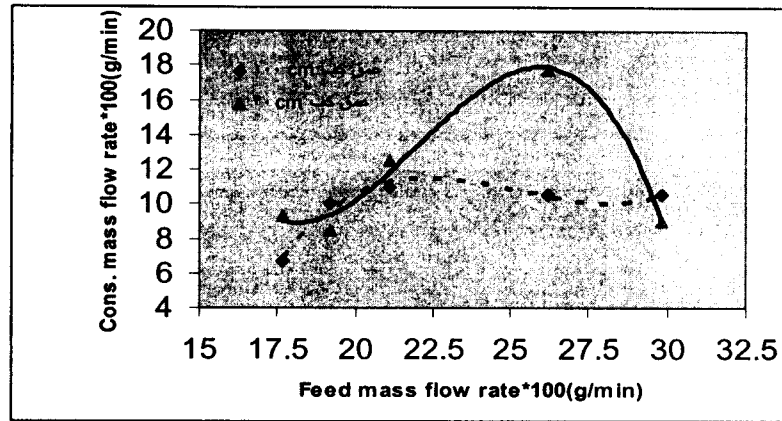
تغییر نرخ جامد خوراک در یک دبی حجمی ثابت، با تغییر درصد جامد آن صورت می گیرد.

همانطورکه قبلاً اشاره شد، ظرفیت حمل جامد در حقیقت حداکثر نرخ حمل آن است. بنابراین با تعیین نرخ حمل جامد برای نرخهای جامد خوراک مختلف، می توان به حداکثر نرخ حمل جامد در ستون دست یافت.

با افزایش نرخ جامد خوراک، نرخ حمل جامد رو به افزایش گذاشته، تا حداکثر مقدار خود پیش می رود ولی پس از آن سیر نزولی پیدا می کند. در حقیقت نمودار نرخ حمل جامد بر حسب نرخ جامد خوراک دارای یک نقطه ماکزیمم است که این نقطه مقدار ظرفیت حمل را دیکته می کند.

روش انجام آزمایشها به این صورت است که ابتدا ستون با پالپ پر می شود و سپس هوادهی صورت می گیرد. شرایط عملیاتی به صورت زیر تنظیم شده است:

دبی حجمی خوراک	1(lit/s)
دبی حجمی	0.85(lit/s)
دبی حجمی	0.3(lit/s)
دبی حجمی	0.1(lit/s)
سرعت ظاهری آب بایاس	0.1(cm/s)
سرعت ظاهری گاز	1.59(cm/s)



شکل ۳: میزان نرخ حمل جامد در مقابل نرخ جامد خوراک.

هیدرودینامیکی باشد. در هر حال برای عملیات بزرگ مقیاس نمایی ستون نیمه صنعتی و طراحی ستون صنعتی فلوتاسیون در کارخانه فرآوری مولیبدنیت، بهتر است که مقادیر حاصل از آزمایش و مقادیر حاصل از مدل، تماماً در نظر گرفته شوند.

### نتیجه گیری

- ۱- با افزایش سرعت ظاهری گاز همانطور که مدل پیش بینی می کند، ثابت سینتیکی افزایش می یابد. اما مطالعات مختلف نشان داده است که این روند افزایشی بعد از مدتی رو به کاهش خواهد گذاشت.
- ۲- ثابت سینتیکی به شدت وابسته به عمق کف است و با کاهش عمق کف افزایش پیدا می کند.
- ۳- همانطور که غلظت سولفور سدیم به عنوان بازدارنده مس روی ثابت سرعت این جزء تأثیر زیادی دارد سایر مواد افزودنی هم باید روی ثابت سرعت تأثیر گذار باشند.
- ۴- با افزایش عمق کف میزان نرخ حمل جامد کاهش می یابد. کاهش میزان نرخ حمل جامد با افزایش عمق کف احتمالاً بدلیل افزایش اثر آب شستشو بر روی حبابها و پس زدن ذرات از روی حبابها است.
- ۵- نتایج حاصل از آزمایشات با نتایج مدل تفاوت فاحشی دارند و به همین دلیل برای طراحی ستون فلوتاسیون صنعتی و بزرگ مقیاس کردن ستون نیمه صنعتی، بایستی هر دو مقدار را در نظر گرفت تا بتوان ضریب اطمینان طراحی را بالا برد. ضرایب بکار برده شده در بزرگ مقیاس نمایی بر اساس یک دورنمای کلی از نتایج آزمایشگاهی، تجربیات گذشته و سعی و خطا خواهد بود.

صورت شکل (۳) ترسیم گردیده است.

برازش منحنی درجه سوم برای داده ها، منجر به تعیین حداکثر نرخ حمل جامد برای دو عمق کف می شود و با تقسیم این مقادیر بر سطح مقطع ستون، مقدار ظرفیت حمل جامد حاصل می گردد. برای عمق کف ۱۰۰ و ۴۰ سانتیمتر، مقدار ظرفیت حمل به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$Ca_{100} = 2.186 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{min}$$

$$Ca_{40} = 3.335 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{min}$$

در انجام آزمایشها فرض بر این بوده است که با تنظیم سرعت ظاهری گاز در حد ۱/۵۹ سانتیمتر بر ثانیه، می توان نرخ حمل را از سرعت ظاهری گاز مستقل کرد. از طرف دیگر آزمایشهای مختلف نشان داده اند که میزان نرخ حمل جامد با کاهش عمق کف افزایش می یابد و این به دلیل کاهش اثر آب شستشو بر روی حبابهای باردار می باشد. این مسئله در اینجا نیز مشاهده می شود و با کاهش عمق کف از ۱۰۰ سانتیمتر به ۴۰ سانتیمتر، میزان ظرفیت حمل از مقدار ۲/۱۸۶ به ۳/۳۳۵ افزایش پیدا می کند. با توجه به رابطه (۷) و با در نظر گرفتن چگالی ۴/۳۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و اندازه ذرات ۲۶ میکرون [4]، ظرفیت حمل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Ca = 5.655 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{min}$$

همانطوریکه مشاهده می شود مقادیر با هم تفاوت زیادی دارند. در عمق کف ۱۰۰ سانتیمتری تفاوت بیشتر می شود و این ممکن است به دلیل پس زدگی زیاد ذرات روی حبابها<sup>۱</sup> و یا بدلیل اثر کلیدی تغییرات

$d_b$	قطر حباب (mm)
$R$	بازیابی
$d_{b0}$	قطر حباب در بالای ستون (mm)
$R_c$	بازیابی زون جمع آوری
$d_p$	قطر ذره (mm)
$R_f$	بازیابی زون کف
$d_{80}$	قطر بر حسب ۸۰٪ عبوری (mm)
$R_{fc}$	بازیابی کلی
$E_K$	کارایی جمع آوری
$R_{\infty}$	بازیابی نهایی
$F$	وزن خوراک (g)
$t$	زمان (min)
$f$	عیار خوراک (/)
$\rho_p$	چگالی ذره $g/cm^3$
$J_B$	سرعت ظاهری آب بایاس (cm/s)
$\varepsilon_g$	ماندگی گاز (/)

## تشکر و قدردانی

لازم است از زحمات بی دریغ جناب آقای مهندس رضایان ریاست محترم تحقیقات معدنی و فرآوری مواد، سرکار خانم مهندس زیدآبادی سرپرست محترم کارخانه پایلوت تغلیظ، آقایان مهندس خیامی و شاه رحمانی کارشناسان فنی کارخانه پایلوت تغلیظ مجتمع مس سرچشمه کرمان کمال تشکر بعمل آید. همچنین از زحمات جناب آقای مهندس مؤمن آبادی سرپرست محترم کارخانه فرآوری مولیبدنیت و سایر پرسنل آن واحد و تمامی عزیزانی که شرایط را برای انجام هر چه بهتر آزمایشات برای مؤلفین فراهم کردند کمال تشکر و قدردانی را داریم.

## فهرست علائم اختصاری

$C$	وزن کنسانتره (g)
$J_g$	سرعت ظاهری گاز (cm/s)
$c$	عیار کنسانتره (/)
$k$	ثابت سینتیکی (1/min)
$Ca$	ظرفیت حمل $g/min/cm^2$
$K_1$	ضریب ثابت
$C_t$	غلظت مواد فلوته شونده در زمان $t$
$k_c$	ثابت سینتیکی زون جمع آوری
$C_0$	غلظت مواد فلوته شونده در $t=0$
$k_{fc}$	ثابت سینتیکی کلی

## مراجع

- 1- Finch, J. A. and Dobby, G. S. (1990). *Column flotation*, Pergamon Press, U.K., PP. 180.
- 2 - Ityokumbul, M. T. and Trubelja, M. P. (1998). "Carrying capacity in a pilot flotation column." *Mineral & Metallurgical Processing*, Vol. 15, No. 2, PP. 41-46.
- 3- Li, H., del Villar, R. and Gomez, C. O. (2001). "Carrying capacity determination and effect on concentration particle size." *Interactions in mineral processing*, PP. 33-45.
- ۴- مهدیزاده. س. م. "بهبود سازی بازداشت کانیهای سولفورس مس در کارخانه فرآوری مولیبدن مجتمع مس سرچشمه." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).
- ۵ - رضایی. ب. "فلوتاسیون." انتشارات دانشگاه هرمزگان، (۱۳۷۵).

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Flotation Columns	2 - Scale Up	3 - Flotation Rate	4 - Batch
5 - Gas Flow Rate	6 - Carrying Capacity	7 - Bias Water	8 - Steady State
9 - Froth Dropback			