

تعیین پارامترهای ساخت و بررسی مقدماتی طراحی سلول ستونی برای کارخانه سرب و روی کوشک با انجام آزمایش‌های فلوتاسیون

سید محمد جواد کلینی^{۱*}، احمد خدادادی^۲، بابک پورحاجت^۳

۱- استادیار گروه فراوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه فراوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

koleini@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۷)

چکیده- سلول‌های فلوتاسیون ستونی از نظر نحوه توزیع هوا و خوراک و آب شستشو، نسبت به سلول‌های مکانیکی برتری‌هایی دارند که عملکرد متالورژیکی بهتر آنها را سبب شده است. در مقاله حاضر روش‌های بزرگ‌نمایی سلول ستونی فلوتاسیون با توجه به نتایج آزمایشگاهی بررسی شده و داده‌های مورد نیاز برای طراحی ستون فلوتاسیون، از آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی در مقیاس آزمایشگاهی با ستونی به ارتفاع ۱۵۰ سانتی متر و قطر ۷۴ میلی‌متر در مرحله شستشوی نهایی کنسانتره روی تهیه شده است. با طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، تعداد چهار پارامتر عملیاتی ستون در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. در شرایط بهینه، محصولی با عیار ۵۲/۸۴٪ روی با بازیابی ۶۹/۸۶٪ و کارایی جدایش ۳۲/۶۱٪ برای روی به دست آمد. عملکرد سلول‌های مکانیکی فلوتاسیون کارخانه در مرحله شستشوی نهایی کنسانتره روی بررسی شد. نتایج نشان داد که سلول‌های مکانیکی در این مرحله، قادر به تولید کنسانتره روی با عیار ۵۲/۱۵٪ روی با بازیابی ۷۵/۱۰٪ و کارایی جدایش ۳۰/۸۴٪ برای روی است. مقایسه نتایج عملکرد سلول‌های مکانیکی فلوتاسیون کارخانه با عملکرد سلول ستونی فلوتاسیون در مرحله شستشوی نهایی کنسانتره روی نشان داد که عملکرد فلوتاسیون ستونی نسبت به فلوتاسیون مکانیکی، ۶۹٪ افزایش در عیار و ۱/۷۷٪ افزایش در کارایی جدایش روی را نشان می‌دهد. همچنین براساس داده‌های به دست آمده، یک سلول فلوتاسیون ستونی به ارتفاع ۸ و قطر ۱/۴ متر طراحی شد.

کلید واژگان: فلوتاسیون ستونی، بزرگ‌نمایی ستون فلوتاسیون، مدل سازی فلوتاسیون، سینتیک فلوتاسیون

۱- مقدمه

ماشین‌ها از نظر نحوه توزیع هوا و خوراک دهی و آب شستشو، نسبت به سلول‌های مکانیکی برتری‌هایی دارند که باعث عملکرد متالورژیکی بهتر آنها شده است.

سلول فلوتاسیون ستونی یکی از موفق‌ترین انواع ماشین‌های فلوتاسیون در چند دهه اخیر است. این

۱-۱- مدل جریان پیستونی

فرایند فلو تاسیون در سلول ستونی آزمایشگاهی و نیمه صنعتی پیوسته از مدل جریان پیستونی که رابطه مرتبه اول است پیروی می کند و بازیابی کلی آن از رابطه ۱ قابل محاسبه است [۱].

$$R_{total} = 1 - \exp(-k\tau_p) \quad (1)$$

که در آن:

R_{total} بازیابی کلی (%)

k ثابت سرعت فلو تاسیون (min^{-1})

τ_p زمان ماند ذرات جامد (min)

زمان ماند ذرات جامد (τ_p) را می توان با استفاده از زمان ماند مایع یا پالپ (τ_{SL})، براساس رابطه ۲ محاسبه کرد:

$$\tau_p = \tau_{SL} \frac{u_i}{u_i + u_{sp}} \quad (2)$$

که در آن u_i و τ_{SL} و u_{sp} به ترتیب سرعت داخلی مایع و زمان ماند مایع یا پالپ و سرعت ته نشینی مواد جامد غیر آزاد که به صورت زیر محاسبه می شوند:

الف- محاسبه سرعت داخلی مایع (u_i):

$$u_i = \frac{J_{sl}}{1 - \epsilon_g} \quad (3)$$

J_{sl} سرعت رو به پایین پالپ است و از فرمول زیر محاسبه می شود [۵].

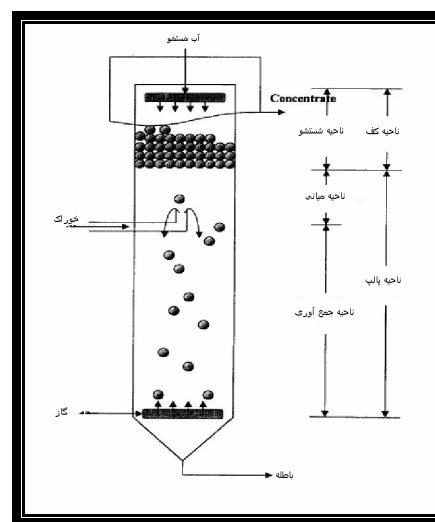
$$J_{SL} \approx J_L \approx \frac{[Q_{fw} + (1 - R_{total}) \cdot Q_{fs}]}{A_c \cdot n} + J_B \quad (4)$$

Q_{fs} و Q_{fw} به ترتیب نرخ جریان آب و جامد خوراک هستند. n تعداد ستون و A_c مساحت مقطع هر ستون به صورت پیشنهادی است [۶].

سلول فلو تاسیون ستونی به طور کلی دارای دو بخش اصلی است که توسط فصل مشترک پالپ و کف از هم جدا می شوند. از سرریز تا سطح مشترک پالپ و کف ناحیه شستشو یا کف نامیده می شود. در این ناحیه حباب های باردار تحت تأثیر آب شستشو قرار می گیرند و ذرات آب پذیر از حباب ها جدا می شوند. بخش دوم که ناحیه پالپ نامیده می شود، از فصل مشترک تا انتهای ستون ادامه دارد. طرحواره عمومی سلول فلو تاسیون ستونی در شکل ۱ نشان داده شده است. سلول های فلو تاسیون ستونی استفاده شده در کارخانه های فراوری؛ معمولاً ارتفاع ۷-۱۵ متر و قطر ۰/۵ تا ۳ متر دارند [۱].

چگونگی فرایند در سلول های فلو تاسیون ستونی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی باتوجه به مدل های مختلف بررسی شده است [۳، ۴، ۵].

فینچ^۱ و دابی^۲ برای مدل سازی فرایند فلو تاسیون در سلول های ستونی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی پیوسته، به ترتیب از مدل های جریان پیستونی^۳ و جریان محوری^۴ استفاده کرده اند [۱].



شکل ۱ طرحواره عمومی سلول فلو تاسیون ستونی

1. Finch J
2. Dobby G.S.
3. Plug Flow Model
4. Axial Flow Model

می‌توان با مدل جریان محوری توصیف کرد. مدل ارائه شده برای سلول‌های ستونی صنعتی چنین است [۴].

$$R_c = 1 - \frac{\varepsilon a \cdot \exp\left(\frac{1}{2N_{dp}}\right)}{\left(1+a\right) \cdot \exp\left(\frac{a}{2N_{dp}}\right) - \left(1-a\right) \cdot \exp\left(-\frac{a}{2N_{dp}}\right)} \quad (10)$$

که a از رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

$$a = \sqrt{(1+4k \cdot \tau_p \cdot N_{dp})} \quad (11)$$

مطابق فرض مدل جریان محوری، ضریب توزیع محوری ذرات نرمه در ستون (N_{dp}) را می‌توان با مقدار توزیع حرکتی مایع (N_{dl}) به دست آورد:

$$N_{dp} = N_{dl} \cdot \frac{u_i}{u_i + U_{sp}} \quad (12)$$

مقدار توزیع حرکتی مایع به طراحی ستون و پارامترهای عملیاتی بستگی دارد:

$$N_{dl} = 1.85 \left[\frac{d_c}{H_c} \cdot \frac{J_g}{J_L} \right]^{0.73} \quad (13)$$

برای بزرگ‌نمایی ستون با دانستن ضریب توزیع ذرات جامد، نرخ ثابت و زمان ماند، بازایی ناحیه جمع‌آوری از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است [۷ و ۸].

بازایی کل از رابطه (۱۴) به دست می‌آید که در آن عموماً بازایی ناحیه کف (R_f) برای ستون صنعتی حدود ۵۰ درصد (R_c) فرض می‌شود.

$$R_{total} = \frac{R_f \cdot R_c}{R_f \cdot R_c + 1 - R_c} \quad (14)$$

چنانچه بخواهیم تعداد ستون‌ها را به یک کاهش دهیم با استفاده از قطر ستون‌های طراحی شده اولیه و با استفاده از رابطه (۱۵)، قطر ستون جدید را می‌توان به دست آورد:

ب- محاسبه زمان ماند ذرات جامد (τ_{SL}):

$$\tau_{SL} = \frac{H_C (1 - \varepsilon_g)}{J_{sl}} \quad (5)$$

ج: محاسبه سرعت ته‌نشینی مواد جامد غیر آزاد (U_{sp}):
 U_{sp} با استفاده از روابط فینچ و دابی به دست می‌آید:

$$U_{sp} = \frac{g \cdot d_p^2 \cdot (\rho_p - \rho_{SL}) (1 - \Phi_p)^{2.7}}{18 \mu_{SL} (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687})} \quad (6)$$

Re_p عدد رینولدز ذرات است و از فرمول زیر به دست می‌آید [۱].

$$\text{Re}_p = \frac{d_p \cdot U_{sp} \cdot \rho_L (1 - \Phi_p)}{\mu_{SL}} \quad (7)$$

Φ_p کسر حجمی ذرات جامد در پالپ است که با استفاده از C_s درصد وزنی ذرات موجود، ρ_p وزن مخصوص ذرات به دست می‌آید.

$$\Phi_p = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{C_s} - 1 \right) \cdot \frac{\rho_p}{\rho_L}} \quad (8)$$

لزجیت پالپ (τ_{SL}) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\mu_{SL} = \mu_L (1 - \Phi_p)^{-2.0} \quad (9)$$

در این مدل و بیشتر مدل‌های مشابه به دنبال روی ذرات توسط جریان آب رو به بالا ناچیز فرض می‌شود [۶].

۱-۲- مدل جریان محوری

با بزرگ شدن ابعاد سلول ستونی و گذر از مقیاس آزمایشگاهی یا پایلوت به مقیاس صنعتی، فرایند فلوتاسیون در سلول ستونی صنعتی دیگر از مدل جریان پیستونی تبعیت نمی‌کند. فرایند فلوتاسیون در سلول‌های ستونی صنعتی را

$$d_{c(design)} = d_{c(base)} \cdot \sqrt{n} \quad (15)$$

مرحله پنجم: محاسبه مقدار τ_p

ابتدا باید u_i از رابطه (۳) محاسبه شود و در ادامه τ_p از رابطه (۲) به دست می آید.

مرحله ششم: محاسبه مقدار N_{dp}

ابتدا N_{dl} از رابطه (۱۳) به دست می آید و سپس N_{dp} از رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

مرحله هفتم: محاسبه R_{total}

ابتدا مقادیر R_c و a از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می شوند و سپس با استفاده از رابطه (۱۴)، R_{total} محاسبه می شود. در صورت مناسب نبودن بازایی به دست آمده، مقدار n تغییر داده شده و مراحل تکرار می شود.

مرحله هشتم: با استفاده از رابطه (۱۵) می توان با کاهش مناسب قطر، سلول جدید را انتخاب کرد.

۲- روش تحقیق و آزمایش ها

آزمایش ها توسط سلول فلوتاسیون ستونی به ارتفاع ۱۵۰ سانتیمتر و قطر ۷۴ میلی متر در محل کارخانه فلوتاسیون سرب و روی کوشک به موازات خط تولید کارخانه و در مرحله شستشوی کنسانتره روی انجام شد. ستون دارای ۳ مانومتر برای کنترل پایداری ستون و اندازه گیری ماندگی گاز بود [۱۰]. خوراک اولیه کارخانه دارای گالن به عنوان کانی سرب و اسفالریت به عنوان کانی روی و همچنین ناخالصی های عمده شیل و پیریت است [۱۱].

خوراک سلول ستونی مانند خوراک شستشوی نهایی کارخانه در نظر گرفته شد.

برای مقایسه نتایج سلول ستونی با سلول مکانیکی ابتدا از ورودی، ته ریز و سر ریز سلول های مکانیکی شستشوی نهایی کنسانتره روی کارخانه، در فواصل منظم ۵ دقیقه ای

۱-۳- بزرگ نمایی ستون

بزرگ نمایی سلول های فلوتاسیون ستونی با استفاده از اطلاعات به دست آمده از سلول های فلوتاسیون آزمایشگاهی یا نیمه صنعتی پیوسته امکان پذیر است. موارد اشتراک دو مدل جریان پیستونی و جریان محوری، تشابه پارامترهای زمان ماند شناوری ذرات و ثابت سرعت فلوتاسیون است. بدین معنا که با اندازه گیری دو پارامتر ذکر شده در سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی پیوسته، مقادیر آنها برای سلول فلوتاسیون صنعتی قابل استفاده است [۶ و ۷].

براساس پیشنهاد دابی و فینچ، بزرگ نمایی سلول های فلوتاسیون ستونی از مقیاس آزمایشگاهی یا نیمه صنعتی پیوسته به مقیاس صنعتی، با رعایت کردن مراحل ذیل امکان پذیر است [۹ و ۲۱].

مرحله اول: مشخص کردن ارتفاع، قطر یا مساحت و تعداد سلول ها

باید ارتفاع (H_c) و قطر (d_{base}) یا مساحت (A_c) مناسب سلول ستونی را از نمونه های صنعتی مشابه به عنوان پایه محاسبات به کار ببریم. بدین منظور مقادیر n و d_{base} را برای شروع طراحی در نظر می گیریم.

مرحله دوم: محاسبه مقدار J_{sl} را با استفاده از رابطه (۴) به دست می آوریم.

مرحله سوم: محاسبه مقدار τ_{sl}

از رابطه ۵ مقدار τ_{sl} را به دست می آوریم.

مرحله چهارم: محاسبه مقدار U_{sp}

با استفاده از روابط (۸) و (۹) و در نظر گرفتن روش سعی و خطا، مقدار U_{sp} از روابط (۶) و (۷) محاسبه می شود.

دان‌بندی جامد پالپ (d_{80}) کمتر از ۷۵ میکرون است. در حین انجام هر آزمایش از ته‌ریز و سرریز سلول ستونی نمونه تهیه و جهت آنالیز روی استفاده گردید [۱۳].

۳- نتایج و بحث

پارامترهای مؤثر بر عملکرد ستون فلوتاسیون، مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت چهار پارامتر دبی خوراک، دبی آب شستشو، دبی هوا و ارتفاع کف به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر عملکرد ستون فلوتاسیون در نظر گرفته شد [۱۷ و ۱۶ و ۱۵ و ۱۴ و ۱۳].

برای هر یک از این پارامترها بر اساس مراجع موجود [۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲] و آزمایش‌های اولیه و محدودیت‌های آزمایشگاهی، سه سطح در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها با استفاده از آرایه L_4 تاگوچی طراحی و انجام شد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار Qualitek-4 تحلیل شد [۲۳ و ۲۴]. شرایط نه آزمایش اولیه در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

۳-۱- نتایج آزمایش‌های اولیه

نه آزمایش تعیین شده توسط روش تاگوچی انجام شد که شرایط عملیاتی آن در جدول ۳ آورده شده است. برای اطمینان بیشتر هر آزمایش یک بار تکرار شده است.

جدول ۲ شرایط آزمایش‌های تعیین شده (آرایه L_4 تاگوچی)

آزمایش‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
پارامترها									
دبی خوراک (LPM)	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۹	۰/۹	۰/۹
دبی هوا (LPM)	۱/۵	۲/۰	۲/۵	۱/۵	۲/۰	۲/۵	۱/۵	۲/۰	۲/۵
دبی آب (LPM)	۰/۱۰	۰/۲۵	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۴۰	۰/۱۰	۰/۴۰	۰/۱۰	۰/۲۵
ارتفاع کف (Cm)	۲۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۰	۳۰	۳۰	۴۰	۲۰

نمونه‌برداری و درصد روی در آن اندازه‌گیری شد. رابطه (۱۶) و (۱۷) به‌ترتیب روش محاسبه بازیابی و کارایی جدایش روی را نشان می‌دهد. نتایج بازیابی و کارایی جدایش سلول شستشوی نهایی کارخانه محاسبه شده و در جدول ۱ آورده شده است [۹ و ۱۲].

$$R = \frac{c.(f-t)}{f.(c-t)} \quad (16)$$

$$SE = \frac{c.(f-t)(c-t)(100-t)}{f.(c-t)^2(100-f)} \quad (17)$$

جدول ۱ عملکرد سلول‌های مکانیکی شستشوی نهایی کنسانتره روی کارخانه

جریان‌ها	خوراک	سرریز	ته‌ریز
مشخصات			
عیار روی (%)	۴۶/۱	۵۲/۱۵	۳۴/۱۵
بازیابی روی (%)	۷۵/۱۰		
کارایی جدایش روی (%)	۳۰/۸۴		

نوع و مقدار مواد شیمیایی مصرف شده برای هر تن سنگ خوراک در خط فلوتاسیون سرب و روی کارخانه به شرح زیر است:

امیل گزنات پتاسیم	۴۰۰ گرم
اتیل گزنات پتاسیم	۴۰۰ گرم
سولفات مس	۷۵۰ گرم
سولفات آهن	۳۵۰ گرم
کف‌ساز	۱۷ گرم
آهک	۷ کیلوگرم

از خوراک ورودی سلول نهایی شستشوی کارخانه، به‌طور مداوم، خوراک برای سلول ستونی تهیه شد. مشخصات این خوراک شامل چگالی، pH، نسبت جامد در مایع به‌ترتیب برابر $1/375 \text{ gr/cm}^3$ ، ۱۱ و ۳۵٪ بود.

جدول ۳ شرایط عملیاتی آزمایش‌های سری اول

مقادیر برای هر آزمایش									واحد	اطلاعات آزمایش
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	LPM	دبی خوراک ورودی سلول
۲/۵۰	۲/۰۰	۱/۵۰	۲/۵۰	۲/۰۰	۱/۵۰	۲/۵۰	۲/۰۰	۱/۵۰	LPM	دبی هوای ورودی حباب‌ساز
۰/۲۵	۰/۱۰	۰/۴۰	۰/۱۰	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۱۰	LPM	دبی آب شستشو
۱/۱۰	۱/۰۰	۱/۲۰	۰/۸۰	۱/۰۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۶۰	LPM	دبی ته‌ریز
۶۴	۶۶	۶۹	۶۴	۶۶	۵۸	۵۳	۵۵	۶۲	Cm	ارتفاع مایع در مانومتر سوم
۸۰	۸۲	۸۲	۸۰	۷۸	۷۱	۷۰	۶۹	۷۵	Cm	ارتفاع مایع در مانومتر دوم
۹۲	۹۵	۹۴	۹۴	۹۱	۹۲	۹۲	۸۹	۹۰	Cm	ارتفاع مایع در مانومتر اول
۸۶	۸۸	۹۱	۸۶	۸۸	۸۰	۷۵	۷۷	۸۴	Cm	P1
۳۴	۳۶	۳۶	۳۴	۳۲	۲۵	۲۴	۲۳	۲۹	Cm	P2
۵	۸	۷	۷	۴	۵	۵	۲	۳	Cm	P3
۲۲	۳۸	۳۰	۳۱	۲۳	۴۱	۴۲	۲۹	۲۱	Cm	ارتفاع کف
۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۸۱	۰/۷۷	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۸۰	۰/۸۱	g/Cm ³	چگالی ناحیه جمع‌آوری
۰/۳۸	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۳۱	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۱۵	۰/۲۳	g/Cm ³	چگالی ناحیه کف
۱۹/۴	۳۷/۰	۲۷/۵	۳۲/۸	۴۲/۷	۴۲/۸	۴۵/۶	۳۱/۱	۲۴/۸	Cm	ارتفاع کف محاسبه شده
۲۳/۷	۲۳/۷	۱۹/۲	۳۲/۸	۱۷/۸	۱۹/۳	۲۵/۲	۲۰/۷	۱۹/۳	%	ماندگی گاز
۰/۰۷۷	۰/۰۳۹	۰/۱۱۶	۰/۰۳۹	۰/۱۱۶	۰/۰۷۷	۰/۱۱۶	۰/۰۷۷	۰/۰۳۹	Cm /s	دبی آب بایاس
۳/۹۰	۳/۷۱	۳/۵۵	۴/۸۱	۴/۴۴	۴/۱۴	۴/۲۰	۵/۸۰	۷/۲۵	min	متوسط زمان ماند ذره

جدول ۴ نتایج آزمایش‌های سری اول و تکرار

شماره آزمایش‌ها		۱		۲		۳		۴		۵	
مشخصات	جریان‌ها	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز
		۳۷/۴	۴۸/۸۷	۳۷/۹	۵۰/۲۶	۳۸/۴۰	۵۱/۸۹	۳۴/۹۵	۵۱/۵۶	۳۴/۷۰	۵۲/۴۸
		عیار روی (%)		۷۲/۳۳		۶۴/۲۵		۷۵/۰۸		۷۲/۹۹	
		بازیابی روی (%)		۲۸/۰۵		۳۱/۵۲		۲۹/۷۹		۳۱/۷۳	
		کارایی جدایش روی (%)		۲۲/۵۵							

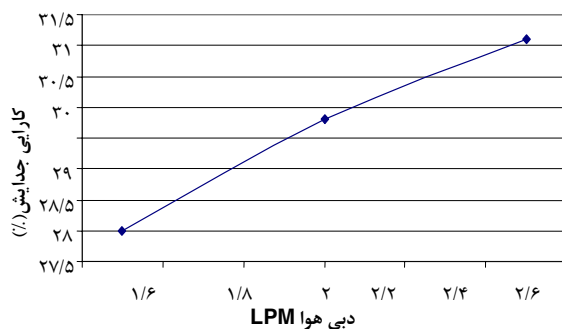
شماره آزمایش ها		۶		۷		۸		۹	
مشخصات	جریان‌ها	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز
		۳۵/۸۰	۵۲/۳۷	۳۹/۸۷	۵۱/۹۸	۳۹/۷۴	۵۰/۵۰	۳۷/۴۱	۴۹/۷۳
	بازایی روی (%)	۷۰/۶۱		۵۸/۰۱		۶۴/۷۵		۷۵/۱۰	
	کارایی جدایش روی (%)	۳۱/۸۳		۳۱/۴۲		۲۹/۶۰		۲۵/۹۲	

جدول ۵ تحلیل آماری داده‌های حاصل از طرح آرایه L_{۱۸} (ANOVA)

پارامترها	درجه آزادی (f)	مجموع مربعات (s)	واریانس (v)	نسبت خطا (F)	جمع خالص (S _e)	درصد تاثیر P(%)
دبی خوراک (LPM)	۲	۴۱/۷۴۴	۲۰/۸۷۸	۱۷۸/۲۷۲	۴۱/۵۴	۲۷/۹۷۷
دبی هوا (LPM)	۲	۸/۰۵۰	۴/۰۲۲	۳۴/۳۵۳	۷/۸۱۵	۵/۲۶۳
دبی آب شستشو (LPM)	۲	۴۹/۸۵۹	۲۴/۹۲۳	۲۱۲/۷۷۶	۴۹/۶۲۵	۳۳/۴۲۳
ارتفاع کف (Cm)	۲	۴۷/۳۳۷	۲۳/۸۶۳	۲۰۳/۷۱۹	۴۷/۵۰۳	۳۱/۹۹۳
خطا و غیره	۹	۱/۰۵۴	۰/۱۱۷			۱/۳۴۴
مجموع	۱۷	۱۴۸/۴۷۶				٪۱۰۰

آنچنان منفی نیست که نشانه عملکرد مناسب سلول در این ناحیه است.

شیب شکل در قسمت اول بیشتر است، لذا می‌توان گفت که میزان تأثیر دبی هوا بر کارایی جدایش در بخش اول بیشتر است. بیشترین مقدار کارایی جدایش در ۲/۵ لیتر بر دقیقه برابر ۳۱/۱٪ است.



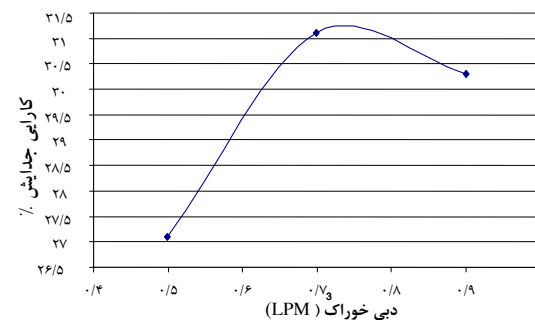
شکل ۳ تأثیر دبی هوا بر کارایی جدایش روی

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش دبی آب شستشو کارایی جدایش افزایش می‌یابد. با افزایش میزان آب شستشو از ۰/۱ لیتر بر دقیقه به ۰/۲۵ لیتر بر دقیقه، کارایی جدایش به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. با افزایش میزان آب شستشو تا حد ۰/۴ لیتر بر دقیقه، شستشوی کف ارتقاء یافته و در نتیجه کارایی جدایش افزایش می‌یابد. لذا در این محدوده ذرات با عیار بالاتری به سرریز منتقل می‌شود. بیشترین کارایی جدایش در ۰/۴ لیتر بر دقیقه آب شستشو و برابر ۳۱/۶٪ به‌دست آمد.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید با افزایش ارتفاع کف تا حدی معین، کارایی جدایش افزایش می‌یابد. نقطه بهینه ۳۳ سانتی‌متر با کارایی جدایش ۳۱/۶٪ است.

از نتایج آزمایش‌ها و یک بار تکرار آنها میانگین گرفته شده که در جدول ۴ آورده شده است. بیشترین عیار روی در آزمایش ۵ و برابر ۵۲/۴۸٪ بوده که در مقایسه با کارکرد سلول مکانیکی کارخانه، عیار روی در حدود ۰/۳۳ درصد افزایش یافته است. بهترین بازیابی در آزمایش ۱ با بازیابی روی برابر ۸۰/۴۱٪ و بهترین کارایی جدایش در آزمایش شماره ۶ به مقدار ۳۱/۸۳٪ اتفاق افتاد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش دبی خوراک تا حد معینی کارایی جدایش افزایش می‌یابد. نقطه بهینه در حدود ۰/۷۴ لیتر بر دقیقه با کارایی جدایش ۳۱/۳٪ است. تأثیر دبی خوراک بر کارایی جدایش در بخش اول شکل (۰/۵ تا ۰/۷ لیتر بر دقیقه) افزایشی است اما در بخش دوم شکل (۰/۷ تا ۰/۹ لیتر بر دقیقه) روندی کاهشی دارد که علت آن را می‌توان اغتشاش ناشی از افزایش دبی خوراک دانست. در این حالت امکانات لازم برای صعود ذرات حاوی روی به سمت سرریز فراهم نیست.



شکل ۲ تأثیر دبی خوراک بر کارایی جدایش روی

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش دبی هوا، کارایی جدایش تقریباً به‌طور خطی افزایش می‌یابد. این روند در محدوده دبی هوای انتخاب شده

پیشنهادی بیشترین تأثیر را دبی آب شستشو و کمترین تأثیر را دبی هوا دارد.

به منظور محاسبه فاصله اطمینان پاسخ (CI) از رابطه (۱۸) استفاده شد:

$$CI = \pm \sqrt{\frac{F(\alpha, l, f) \times v_e}{n_e}} \quad (18)$$

که در آن F نسبت بوده و با توجه به محدودیتهای مربوط از جدول فیشر قابل استخراج است. α میزان ریسک در سطح اعتماد ۹۵٪ برابر ۰/۰۵ است. l درجه آزادی هر پارامتر و درجه آزادی خطا بوده که مقادیر آنها به ترتیب از جدول ۵ برابر ۲ و ۹ است. v_e واریانس خطا برابر ۰/۱۱۷ و n_e تعداد پاسخهای مؤثر است.

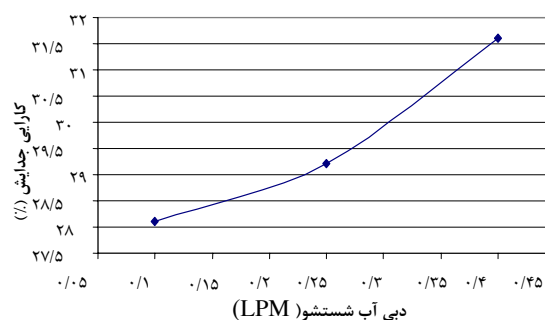
پس از به دست آمدن نسبت فیشر $(F(0/05, 2, 9) = 5/12)$ ، فاصله اطمینان برابر $1/788 \pm$ محاسبه شد [۲۵]. بنابراین محدوده مؤثر کارایی جدایش برابر است با:

$$34/298 \pm 1/788 =_{ep} Y \quad (19)$$

با توجه به کارایی جدایش پیشنهادی نرم افزار و مقدار خطای به دست آمده از جدول ۵، کارایی جدایش آزمایش تأیید باید در محدوده ۳۶/۰۹-۳۲/۵۱ درصد باشد تا آزمایش ها از لحاظ آماری معنادار باشند.

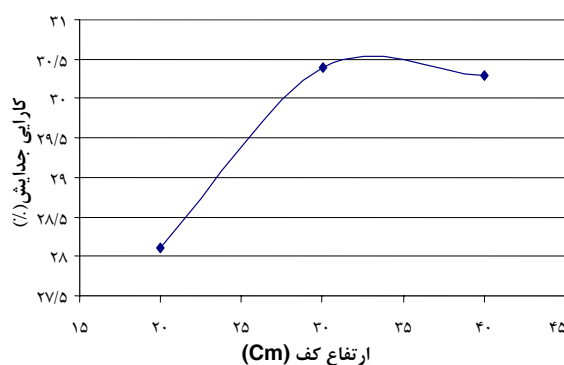
۲-۳- نتایج آزمایش تأیید

آزمایش تأیید نهایی بر اساس شرایط پیشنهادی نرم افزار انجام شد که شرایط عملیاتی آن در جدول ۷ و نتایج به دست آمده در جدول ۸ مشاهده می شود.



شکل ۴ تأثیر دبی آب شستشو بر کارایی جدایش روی

تأثیر ارتفاع کف بر کارایی جدایش، در بخش اول شکل (۲۰ تا ۳۰ سانتی متر) افزایشی است اما در بخش دوم نمودار (۳۰ تا ۴۰ سانتی متر) روندی کاهشی دارد.



شکل ۵ تأثیر ارتفاع کف بر کارایی جدایش روی

قدر مطلق شیب شکل در قسمت اول بیشتر است، در نتیجه میزان تأثیر ارتفاع کف بر کارایی جدایش در بخش اول بیشتر است. ارتفاع بهینه کف ۳۳ سانتی متر با کارایی جدایش برابر ۳۰/۶٪ است.

جدول ۶ شرایط بهینه پیشنهادی نرم افزار را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود در آزمایش

جدول ۶ شرایط بهینه پارامترهای عملیاتی ستون فلوتاسیون پیشنهادی نرم افزار

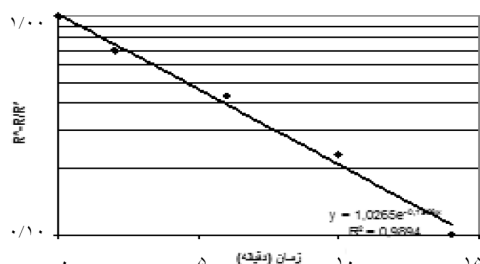
پارامترها	سطح	مقدار سطح	سهم
دبی خوراک (LPM)	۲	۰/۷	۲/۰۵۷
دبی هوا (LPM)	۲	۲/۰	۰/۵۱۵
دبی آب شستشو (LPM)	۳	۰/۴	۲/۳۴۳
ارتفاع کف (Cm)	۳	۴۰	۱/۱۸۳
سهم تمامی عوامل			۶/۰۹۷
متوسط عملکرد			۲۸/۱۹۱
کارایی جدایش احتمالی با شرایط بهینه			۳۴/۲۹۸

جدول ۷ شرایط عملیاتی آزمایش تأیید

اطلاعات آزمایش	واحد	مقادیر هر آزمایش
دبی خوراک	LPM	۰/۷۰
دبی هوا	LPM	۲/۰
دبی آب شستشو	LPM	۰/۴
دبی ته ریز	LPM	۰/۹۰
ارتفاع مایع در مانومتر سوم	Cm	۶۱
ارتفاع مایع در مانومتر دوم	Cm	۷۸
ارتفاع مایع در مانومتر اول	Cm	۹۴
P1	Cm	۸۳
P2	Cm	۳۲
P3	Cm	۷
ارتفاع کف قرائت شده	Cm	۴۰
چگالی ناحیه جمع آوری	g/Cm^3	۰/۷۶
چگالی ناحیه کف	g/Cm^3	۰/۵۴
ارتفاع کف محاسبه شده	Cm	۴۲/۴۵
ماندگی گاز	%	۲۵/۱۹
دبی آب بایاس	Cm/sec	۰/۰۷۴۴
متوسط زمان ماند ذره	min	۳/۸۵

جدول ۸ نتایج آزمایش تأیید

جریان‌ها	خوراک	سرریز	ته ریز
مشخصات			
عیار روی (%)	۴۶/۱	۵۲/۸۴	۳۵/۵۸
بازیابی روی (%)		۶۹/۸۶	
کارایی جدایش روی (%)		۳۲/۶۱	



شکل ۷ محاسبه ثابت سینتیک سولفید روی با سلول ستونی

سپس با توجه به رابطه (۲۱) با اندازه‌گیری شیب نمودار نیمه - لگاریتمی زمان و $1-R/R_{\infty}$ ثابت سینتیک فلوتاسیون به‌دست می‌آید [۱۹].

برای به‌دست آوردن ثابت سینتیک، یک آزمایش فلوتاسیون ستونی با شرایط بهینه انجام و در این آزمایش در فواصل زمانی معین از ستون نمونه‌برداری شد. نتایج عیار و بازیابی روی در جدول ۹ مشاهده می‌شود.

شکل ۶ منحنی زمان - بازیابی روی و شکل ۷ نمودار زمان $1-R/R_{\infty}$ را نشان می‌دهد. لذا مقدار ثابت سینتیک (K) برابر 0.15 min^{-1} به‌دست می‌آید. با اندازه‌گیری شیب نمودار مقدار ثابت سینتیک به‌دست آمد.

۳-۴- طراحی سلول فلوتاسیون ستونی

اطلاعات اولیه لازم برای طراحی سلول فلوتاسیون ستونی که در حالت بهینه و آزمایش تأیید در این تحقیق به‌دست آمده در جدول ۱۰ به‌طور خلاصه آورده شده است.

در طراحی اولیه سلول فلوتاسیون ستونی ابتدا با تعداد (n) دو سلول، هر یک به قطر (d_{base}) یک متر (مقطع ستون دایره به مساحت 0.785 m^2) و به ارتفاع هشت متر در نظر گرفته شد.

سپس با اعمال اطلاعات جدول ۱۰ و انجام مراحل اول تا هفتم بخش بزرگ نمای ستون فلوتاسیون، طراحی اولیه ستون فلوتاسیون با کارایی نهایی ۷۱٪ تأیید شد. همچنین به‌منظور کاهش تعداد ستون‌ها، مرحله هشتم بزرگ نمایی ستون انجام و در نهایت تعداد یک ستون به قطر ۱/۴ متر (مساحت ۱/۵ متر مربع) و ارتفاع ۸ متر برای انجام عملیات در مرحله شستشوی کنسانتره روی کارخانه پیشنهاد شد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود از سلول فلوتاسیون ستونی در شرایط بهینه، کنسانتره روی با عیار ۵۲/۸۴٪ و کارایی جدایش ۳۲/۶۱٪ به‌دست آمد.

با مقایسه نتایج جدولهای ۸ و ۱ می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد سلول ستونی نسبت به سلول مکانیکی شستشوی کارخانه مناسب‌تر است به‌طوری که به میزان ۰/۶۹٪ و ۱/۷۷٪ به‌ترتیب در عیار و کارایی جدایش روی افزایش نشان می‌دهد. از طرف دیگر کارایی جدایش آزمایش تأیید ۳۲/۶۱٪ در محدوده اطمینان کارایی جدایش پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار قرار دارد که تأییدی بر درستی آزمایشهای انجام شده است.

۳-۳- نتایج آزمایش‌های تعیین ثابت سینتیک

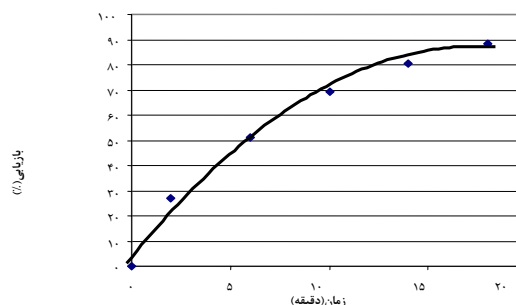
نظر به اینکه فرایند فلوتاسیون هیچگاه دارای بازیابی ۱۰۰٪ نبوده و فرایندی درجه اول محسوب می‌شود، لذا با مدل سینتیکی رابطه (۲۰) قابل توجیه است:

$$R = R_{\infty} (1 - e^{-kt}) \quad (20)$$

R_{∞} بازیابی در زمان طولانی است. رابطه (۲۰) با اندکی جابه‌جایی به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\ln(1 - R/R_{\infty}) = -kt \quad (21)$$

بنابراین برای به‌دست آوردن ثابت سینتیک فلوتاسیون (K)، باید در فواصل زمانی معین از ستون نمونه برداری شده و بازیابی (R) در هر نوبت به‌دست آید [۲۶ و ۲۷].



شکل ۶ روند افزایش بازیابی در طول زمان

جدول ۹ نتایج نمونه برداری در زمان‌های مختلف

زمان نمونه گیری (دقیقه)		۲		۶		۱۰		۱۴		۱۸	
جریان‌ها	مشخصات	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز	ته‌ریز	سرریز
عیار روی (%)		۴۳/۴۹	۵۵/۱۲	۳۹/۴۶	۵۴/۸۴	۳۴/۰۵	۵۴/۷۷	۳۱/۱۱	۵۲/۱۹	۳۰/۰۴	۴۹/۶۴
بازیابی روی (%)		۲۶/۸۳	۵۱/۳۶		۶۹/۰۹		۸۰/۵۳		۸۸/۲۳		

جدول ۱۰ خلاصه اطلاعات اولیه حاصل از آزمایش تأیید

عنوان	علائم	واحد	مقدار
عیار روی در خوراک	f	%	۴۶/۱
عیار روی در کنسانتره	c	%	۵۲/۸۴
عیار روی در باطله	t	%	۳۵/۵۸
بازیابی کل	R _{total}	%	۶۹/۸۶
دبی خوراک	Q _{FS}	LPM	۰/۷۰
دبی هوا	J _g	LPM	۲/۰
دبی آب شستشو	Q _F	LPM	۰/۴۰
دبی ته ریز	Q _U	LPM	۰/۹۰
ماندگی گاز	ε_g	%	۲۵/۱۹
دبی آب بایاس	J _b	Cm/s	۰/۰۷۴۴
زمان مانده ذره	τ_p	Min	۳/۸۵
وزن مخصوص ذرات	ρ_p	g/Cm ^۳	۱/۳۷۵
وزن مخصوص آب	ρ	g/Cm ^۳	۱
درصد جامد در پالپ	C _S	%	۳۵
ثابت سینتیک	K	Min ^{-۱}	۰/۱۵
قطر متوسط ذرات	d ₈₀	μ_m	۷۵

۴- نتیجه گیری

آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی در محل کارخانه فلوتاسیون کوشک در مرحله شستشوی نهایی با به‌کارگیری سلول فلوتاسیون ستونی انجام شد. با به‌کارگیری طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، تعداد چهار پارامتر عملیاتی ستون در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. در شرایط بهینه محصولی با عیار روی ۵۲/۸۴٪ با بازیابی ۶۹/۸۶٪ و کارایی جدایش ۳۲/۶۱٪ برای روی به‌دست آمد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که عملکرد سلول ستونی نسبت به سلول مکانیکی شستشوی کارخانه افزایشی برابر ۰/۶۹٪ در عیار و ۱/۷۷٪ در کارایی جدایش روی داشت. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش تأیید در حالت بهینه ایجاد سلول ستونی فلوتاسیون مناسب طراحی شد، لذا ستونی به ارتفاع ۸ و قطر ۱/۴ متر طراحی شد.

۵- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از دانشگاه تربیت مدرس و کارخانه کوشک که امکان این تحقیق را فراهم آوردند، تشکر می‌شود.

۶- منابع

- [4] Wilson, S.W. and Stratton-Crawley, R., "Design of Production Scale Flotation Columns Using A First Order Kinetic Model". In Column '91 (eds. Agar et al.), Canada, 1991, 165-179.
- [5] Goodall, C.M. and O'Connor, C.T., "Residence Time Distribution Studies in a Flotation Column. Part 1: The Modeling of Residence Time Distributions in a Laboratory Column Flotation Cell". International Journal of Mineral Processing, Vol.31, os.1/2, 1991, 97-113.
- [6] Idlas S. and et al., "Conceptual Design of Packed Flotation Columns", Znd. Eng. Chem. Res. Vol. 29, 1990, 943-949.
- [7] Alford, R.A., "Modelling of single flotation column stages and column circuits", International Journal of Mineral Processing, Vol. 36, 1992, 155-174.
- [8] DelVillar, R., Finch, J.A. and GOMEZ, C.O., "Flotation Column Amenability and Scale- up Parameter Estimation Tests", Minerals Engineering, Vol. 5, No. 2, 1992, 169-182.
- [9] Dobby, G.S. and Finch, J.A. "Column Flotation: A Selected Review, part II", Minerals Engineering, Vol. 4, No 7-11, 1991, pp. 911-923.

- [1] Finch, J. and Dobby G.S. "Column Flotation", pergman press, 1990.
- [2] Quinn, M and Crawley R., "A Feed-Line Aerated Flotation Column Part 2: Modelling and Scale-up ", Mineral, Engineering, Vol. 9. No. 6, 1996, 655-666.
- [3] Mankosa, M.I. and et al., "A Study of Axial Mixing in Column Flotation". Inter. J. Min. Process., Vol. 35, 1992, 51-64.

[۱۰] کلینی، م. ج و بهروزی، ک "راهنمای استفاده، تعمیر و نگهداری از سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی"، ۱۳۸۴.

- Dynamics". Minerals Engineering, Vol 7, Nos. 2/3, 1994, 345-355.
- [19] Sullivan, M.J., "The Concentrator the last (and the best) 30 years", Minerals Engineering 19, 2006, 825-859.
- [20] Pyecha, J., "Evaluation of a MicrocelTM sparger in the Red Dog column flotation cells", Minerals Engineering, Volume 19, Issues 6-8, May-July 2006, 2005, 748-757.
- [21] Neethling, S.J., and etal. , "The use of FrothSim to optimize the water addition to a column flotation cell", Minerals Engineering Vol. 19, 2006, 816-823.
- [22] Bergh, L.G. and Yianatos, J.B., "Control Alternatives for Flotation Columns", Minerals Engineering, Vol. 6, No.6, 1993, 631-642.
- [23] Motgomery, D.C., "Design and analysis of experiments", Wiley, 1997.
- [24] Taguchi, G., " System of experimental design", vol. 1, KRAVA International publication, 1987.
- [25] Taguchi, G., " System of experimental design", vol. 2, KRAVA International publication, 1988.
- [۲۶] رضائی، ب.، "فلوتاسیون" دانشگاه هرمزگان، ۱۳۷۸.
- [۲۷] نعمت‌اللهی، ح؛ "کانه آرایه"؛ دانشگاه تهران، ۱۳۷۵.
- [۱۱] کریمی، غ و دیگران؛ بررسی عملکرد کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی فلزی استان یزد؛ پایگاه داده‌های علوم زمین؛ ۱۳۸۲.
- [۱۲] بنیسی، ص.، "مسائل کاربردی فرآوری مواد معدنی"، دانشگاه هرمزگان، ۱۳۸۳.
- [۱۳] پورحاجت، ب "طراحی کارخانه فرآوری سرب و روی کوشک با ظرفیت ۱۸۰۰ تن خوراک در روز با استفاده از سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی و ستونی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [۱۴] بارانی، ک، "بررسی عوامل موثر بر فلوتاسیون ستونی هماتیت در کارخانه فرآوری چادرملو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲.
- [۱۵] عبد‌اللهی، م، کلینی، م ج و پاگرد مقنی، ح "تعیین نوع و میزان مواد شیمیایی مصرفی در فلوتاسیون ستونی هماتیت معدن چادرملو"، مجله دانشکده فنی، دانشگاه تهران، جلد ۴۰ شماره ۱، ۱۳۸۴.
- [۱۶] کلینی، م ج، خدایاری، ا و بارانی، ک "مطالعه و بررسی فرآوری کانسنگ آهن چادرملو با فلوتاسیون ستونی"، مجله امیر کبیر، جلد ۶۱ شماره ۱، ۱۳۸۵.
- [۱۷] قلزاده، س، "جایگزینی سلول فلوتاسیون ستونی در کارخانه فرآوری سرب و روی منصور آباد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [18] Bergh, L.G. and Yianatos, J.B., "Experimental Studies on Flotation Column

۷- فهرست علائم

علائم	شرح	واحد	علائم	شرح	واحد
k	ثابت سرعت فلو تاسیون	min^{-1}	T	عیار در ته ریز	%
N_d	توزیع ابعادی ذرات شناور		$\mathcal{E}_g$	ماندگی گاز	%
τ_p	زمان مانده ذرات جامد	min	$\mathcal{E}_p$	ماندگی پالپ	%
τ_{SL}	زمان مانده مایع یا پالپ	min	dbase	قطر پایه	cm
u_i	سرعت داخلی مایع	cm/s	Usp	سرعت ته نشینی مواد جامد غیر آزاد	cm/s
U _{sp}	سرعت ته نشینی مواد جامد غیر آزاد	cm/s	Rep	عدد رینولدز ذرات	
μ_{sl}	لزجیت پالپ	gr/cm.s	Φ_p	کسر حجمی ذرات جامد در پالپ	
N _{dp}	توزیع محوری ذرات نرمه در ستون		Φ_l	کسر حجمی مایع در پالپ	
N _{dl}	توزیع حرکتی مایع		Cs	درصد وزنی ذرات موجود	
d _c	قطر ستون	cm	ρ_p	وزن مخصوص ذرات	gr/cm ³
H _c	ارتفاع ستون	cm	μ_l	لزجت مایع	gr/cm.s
a	ضریب در معادله		Rc	بازیابی ناحیه جمع آوری	%
J _{sl}	سرعت رو به پائین پالپ	cm/s	Rf	بازیابی ناحیه کف	%
J _l	سرعت رو به پائین مایع	cm/s	Qfw	دبی جریان آب	cm ³ /s
J _b	نرخ آب بایاس	cm/s	Qfs	دبی جامد خوراک	cm ³ /s
f	عیار در خوراک	%	n	تعداد ستون پایه	
C	عیار در سر ریز	%	R_∞	بازیابی در زمان طولانی	%
			Rtotal	بازیابی کلی	%
			QU	دبی ته ریز	cm/s