

بررسی شرایط هیدرودینامیکی فلوتاسیون ستونی کنسانتره روی باما با استفاده از روش آماری سطح

علی اکبر عبدالله زاده^۱، حسنا دارابی^۲

۱- عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، Aabd Zad@kashanu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، H.Darabi@grad.kashanu.ac.ir

(دریافت ۲۴ آذر ۱۳۹۱، پذیرش ۱۸ تیر ۱۳۹۲)

چکیده

عملکرد فلوتاسیون ستونی تا حد زیادی به شرایط هیدرودینامیکی فرآیند از جمله ماندگی گاز (E_g)، دانسیته ناحیه جمع‌آوری (ρ_c) و دانسیته ناحیه کف (ρ_f) وابسته است. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای عملیاتی ستون (نرخ هوا ۰/۷۸-۱/۳، نرخ جریان آب شستشو ۰/۱-۰/۲، نرخ جریان خوراک ۰/۳۹-۰/۹۱ (cm/s) و ارتفاع کف ۴۵-۶۵ (cm)) بر شرایط هیدرودینامیکی فرآیند در یک ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی با ارتفاع ۴۰۰ و قطر ۱۰ سانتیمتر بر روی نمونه کنسانتره مرحله رافر واحد فلوتاسیون روی کارخانه ایرانکوه بررسی شد. برای طراحی آزمایش‌ها، تحلیل نتایج و ارائه مدل برای هر یک از پارامترهای هیدرودینامیکی از روش سطح - پاسخ (RSM) استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش هر یک از چهار پارامتر عملیاتی ارتفاع کف، نرخ جریان خوراک، نرخ آب شستشو و نرخ هوا، E_g افزایش و ρ_c کاهش یافت. همچنین افزایش نرخ هوا و نرخ آب شستشو سبب افزایش ρ_f و افزایش نرخ جریان خوراک و ارتفاع کف، سبب کاهش ρ_f شد. تأثیرگذارترین پارامترها در تعیین ماندگی گاز و دانسیته ناحیه جمع‌آوری، به ترتیب نرخ آب شستشو و ارتفاع کف و برای دانسیته ناحیه کف، به ترتیب نرخ جریان خوراک و نرخ آب شستشو تشخیص داده شد. به ازای افزایش نرخ آب شستشو از ۰/۱ تا ۰/۲ (cm/s)، E_g از ۱۵/۸۵٪ به ۱۹/۹۷٪ رسید و ρ_c به میزان ۰/۱ (g/cm³) کاهش یافت. همچنین با افزایش ارتفاع کف از ۴۵ تا ۶۵ cm، E_g از ۱۵/۰۱٪ به ۱۹/۱۳٪ افزایش و ρ_c ۰/۰۵ (g/cm³) کاهش یافت. به ازای افزایش نرخ خوراک از ۰/۳۹-۰/۹۱ (cm/s)، ρ_f به میزان ۰/۱۷ (g/cm³) کاهش یافت و با افزایش نرخ آب شستشو از ۰/۱ تا ۰/۲ (cm/s)، ρ_f به میزان ۰/۱ (g/cm³) افزایش یافت. برای دانسیته ناحیه جمع‌آوری و ماندگی گاز مدل خطی و برای دانسیته ناحیه کف مدل درجه دوم براساس پارامترهای عملیاتی ارائه شد.

کلمات کلیدی

فلوتاسیون ستونی، کارخانه ایرانکوه، روش CCD، ماندگی گاز، شرایط هیدرودینامیکی

۱- مقدمه

آن و بررسی اثر مشترک متغیرها بر پاسخ هستند. از اینرو از این روش در زمانی که انتظار می رود تأثیر متغیرهای ورودی بر پاسخ غیرخطی باشد می توان استفاده کرد. در روش های طراحی آزمایش RSM، عموماً از رابطه های (۱) و (۲) جهت بدست آوردن معادلات مدل مربوط به فرآیندهایی که تغییرات آن به ترتیب به صورت خطی و درجه دوم است، استفاده می شود [۶].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن y متغیر پاسخ، x ها متغیرهای ورودی فرآیند، ε ، خطای محاسبه شده در مدل و β ها ضرایب مدل هستند.

روش CCD یکی از روش های استاندارد در RSM است که به دلیل انعطاف پذیری در طراحی، به طور گسترده ای در مدلسازی و بهینه سازی فرآیندهای مهندسی استفاده شده است. این روش یک روش فاکتوریل دو سطحی است که به آن نقاط مرکزی و محوری اضافه شده است تا رفتار انحنا در مدل به خوبی مشخص شود. در واقع قرار دادن نقاط جدید در طول محوری فضای بین سطوح فاکتورها باعث افزایش قدرت تخمین شده و خصوصیات انحنا را بهتر مشخص می کند. نقطه مرکزی برابر با میانگین دو سطح بالا و پایین است و نقاط محوری در فاصله ی معینی (α) نصف فاصله دو سطح بالا و پایین) از نقطه مرکزی قرار می گیرند. ضریب α را می توان از طریق تحقیق به دست آورد، اما این ضریب بسیار نزدیک به جذر تعداد پارامترها است. به طور معمول اگر تعداد پارامترها کمتر از ۶ باشد، ضریب α برابر با $1/\sqrt{6}$ است [۸]. مقدار کددار پارامترها برای نقاط فاکتوریل (با حقیقی) برابر است با ± 1 (مقدار مثبت برای سطح بالا و منفی برای سطح پایین)، برای نقاط محوری برابر با $\pm \alpha$ و برای نقطه مرکزی برابر با صفر است. این روش جهت بهینه سازی پارامترهای تولید کنسانتره گرافیت استفاده شده است [۹]. در مدلسازی و بهینه سازی فرآیند استخراج اسید بوریک از کلمانیت نیز روش CCD به کار رفته است [۱۰]. همچنین مهربانی و همکاران [۱۱]، برای مدلسازی و بهینه سازی فلوتاسیون اسفالریت از کانه کم عیار سرب- روی از روش CCD استفاده کرده اند. ذکر این نکته ضروری است که مدل های ارائه شده به روش سطح - پاسخ، از جمله مدل های تجربی غیرسینتیکی هستند (با سینتیک فلوتاسیون ارتباطی ندارند) که برای محدوده ی مورد آزمایش متغیرهای ورودی کاربرد دارند و قابلیت برون یابی ندارند [۱۲].

فلوتاسیون ستونی یک فرآیند جدایش فیزیکی و شیمیایی است که در اثر اتصال حباب های ریز هوا با ذرات آبران اتفاق می افتد. شرایط هیدرودینامیکی ستون بر احتمال برخورد حباب - ذره، زمان ماند فازهای مختلف و حدود اختلاط داخل ستون تأثیر می گذارد. بنابراین عملکرد فلوتاسیون ستونی تا حد زیادی به شرایط هیدرودینامیکی فرآیند از جمله ماندگی گاز، دانسیته ناحیه جمع آوری، دانسیته ناحیه کف وابسته است [۱]. ماندگی گاز در ناحیه جمع آوری، پارامتر مهمی است که می تواند تأثیر قابل توجهی بر زمان ماند و جمع آوری ذرات داشته باشد [۲]. براساس مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف، افزایش ماندگی گاز در ناحیه جمع آوری (در محدوده رژیم جریان حبابی) به دلیل کاهش زمان ماند ذرات در این ناحیه با کاهش بازیابی و افزایش عیار کنسانتره همراه است [۳-۵]. باید توجه داشت که با افزایش ماندگی گاز، سطح در دسترس بیشتر می شود و ممکن است بدین طریق بر تأثیر کاهش بازیابی غلبه کند و نتیجه نهایی افزایش بازیابی باشد که عمدتاً نیز چنین است. افزایش نرخ هوا نیز به دلیل افزایش ماندگی گاز سبب کاهش اختلاف فشار در ناحیه جمع آوری می شود، در نتیجه دانسیته ناحیه جمع آوری رابطه معکوس با ماندگی گاز دارد. از اینرو افزایش دانسیته ناحیه جمع آوری معمولاً با افزایش بازیابی و کاهش عیار همراه است. در مورد ناحیه کف اطلاعات زیادی در دست نیست اما براساس مطالعات انجام شده توسط فینچ و دابی افزایش دانسیته ناحیه کف معمولاً با افزایش بازیابی همراه است [۵]. ذکر این نکته ضروری است که اگر افزایش نرخ هوا منجر به بزرگتر شدن حباب ها شود، ماندگی گاز کاهش می یابد. نرخ هوا، نرخ خوراک ورودی، نرخ آب شستشو، ضخامت کف و مقدار مصرفی مواد شیمیایی مهمترین پارامترهایی هستند که عملکرد فلوتاسیون ستونی را تحت تأثیر قرار می دهند [۳، ۴]. بررسی میزان تأثیر هر یک از این پارامترها و نیز تأثیر متقابل آنها بر شرایط هیدرودینامیکی ستون مستلزم انجام تعداد قابل ملاحظه ای آزمایش و صرف زمان و هزینه است. استفاده از روش های طراحی آزمایش امکان بهینه سازی تعداد آزمایش های مورد نیاز را فراهم می سازد. از جمله روش های پر کاربرد در طراحی آزمایش ها می توان به روش های تاگوچی، فاکتوریل و روش سطح- پاسخ (RSM) اشاره کرد [۶]. روش سطح- پاسخ مجموعه ای از تکنیک های ریاضی و آماری است که برای مدلسازی و آنالیز مسائلی که در آن متغیر پاسخ متأثر از چندین متغیر ورودی است، استفاده می شود [۷]. طراحی هایی که به این روش انجام می شوند قادر به برازش سطح بر روی پاسخ و در نتیجه شناسایی وجود انحنا و چگونگی

نرخ بایاس بصورت جریان رو به پایین خالص آب از میان کف و یا معادل آن تفاوت خالص نرخ جریان پالپ در باطله (J_T) و خوراک (J_F) تعریف شده است [۵]:

$$J_B = J_T - J_F \quad (۶)$$

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی

آزمایش‌های فلوتاسیون با استفاده از یک ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۴۰۰ سانتی‌متر انجام شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، این سیستم فلوتاسیون ستونی شامل تانک ۱۰۰ لیتری خوراک، دو پمپ پرستالتیک برای اندازه‌گیری و کنترل دقیق نرخ خوراک و باطله و دو جریان‌سنج برای تنظیم نرخ هوا و آب شستشو است. خوراک پس از آماده‌سازی در مخزن خوراک به وسیله پمپ با نرخ مشخص از ارتفاع ۸۰ سانتیمتری لبه بالایی ستون وارد می‌شود. این ستون مجهز به سیستم کنترل اتوماتیک و مانیتورینگ است و با اطلاعات حاصل از سنسورهای نصب شده روی ستون که از طریق آنها می‌توان اختلاف فشار بین بخش‌های مختلف را اندازه‌گیری نمود برای ثابت نگه‌داشتن ارتفاع کف، پمپ باطله به طور اتوماتیک کنترل می‌شود. سه حسگر فشار به ترتیب در ارتفاع ۳۰، ۱۲۰ و ۳۸۰ سانتیمتری از لبه بالایی ستون قرار گرفته‌اند. داده‌های خام به دست آمده از حسگرها پس از پردازش، برای محاسبه پارامترهای هیدرودینامیکی (ماندگی‌گاز، دانسیته ناحیه جمع‌آوری، دانسیته ناحیه کف) با استفاده از روابط موجود استفاده می‌شوند.



شکل ۱: نمای ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی

در این تحقیق تأثیر پارامترهای عملیاتی ستون (نرخ هوا، نرخ آب شستشو، نرخ خوراک و ارتفاع کف) بر شرایط هیدرودینامیکی (ماندگی‌گاز، دانسیته ناحیه کف، دانسیته ناحیه جمع‌آوری) فلوتاسیون ستونی کنسانتره مرحله رافر روی کارخانه باما در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای هریک از پارامترهای هیدرودینامیکی ستون، مدلی براساس پارامترهای عملیاتی با استفاده از روش CCD ارائه شده است. لازم به ذکر است، در روش یک فاکتور در هر زمان، اثرات مشترک فاکتورها در نظر گرفته نمی‌شود. در کارهایی نیز که از طرح‌های آزمایشی استفاده شده است، معمولاً به روش تاگوچی (صرفاً به علت کم بودن تعداد آزمایش‌ها) اکتفا شده است. این در حالی است که یکی از عیب‌های اساسی روش تاگوچی، در نظر نگرفتن اثرات مشترک و در هم آمیختگی اثرات اصلی با اثرات مشترک است. در تحقیق حاضر، از روش طراحی آزمایش سطح - پاسخ با ۲۱ آزمایش استفاده شده است تا علاوه بر اثرات اصلی فاکتورها، اثرات مشترک آنها نیز دیده شود.

تعریف اصطلاحات و واژه‌هایی که در این تحقیق استفاده شده به شرح زیر است:

نرخ یا سرعت ظاهری پارامتر i (آب شستشو، هوا، خوراک و غیره) عبارت است از نرخ حجمی آن (Q_i) به سطح مقطع ستون (A_c) و یا:

$$j_i = \frac{Q_i}{A_c} \quad (۳)$$

ماندگی‌گاز کسر حجمی گاز موجود در ناحیه مشخصی از ستون است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl} g \Delta H} \quad (۴)$$

که در آن ΔP اختلاف فشار بین دو نقطه مورد نظر، ΔH فاصله بین نقاط و ρ_{sl} متوسط دانسیته پالپ در آن ناحیه است. دانسیته پالپ در ناحیه جمع‌آوری (ρ_c) و ناحیه کف (ρ_f) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\rho_c = \frac{(P_1 - P_2)}{(H_1 - H_2)g} \quad \text{و} \quad \rho_f = \frac{P_3}{H_3 g} \quad (۵)$$

که در آن P_1 ، P_2 و P_3 به ترتیب فشار در نقاط ۱، ۲ و ۳، H_1 و H_2 و H_3 به ترتیب فواصل حسگرهای فشار ۱، ۲ و ۳ از بالای ستون است [۵].

۲-۲- مشخصات ماده معدنی

در تمام آزمایش‌ها خوراک با ۱۱ درصد وزنی جامد و پس از تنظیم pH (در حدود ۸/۵) در مخزن آماده‌ساز خوراک به وسیله پمپ خوراک با نرخ مشخص وارد ستون فلوتاسیون شد. پس از شروع هر آزمایش ۱۵-۱۰ دقیقه (دو تا سه برابر زمان ماند ذرات) به سیستم فرصت داده شد تا به شرایط پایدار برسد. بعد از حصول اطمینان از پایداری جریان داخل سلول، پارامترهای پاسخ ثبت شد.

در تمام آزمایش‌ها از کنسانتره روی مرحله رافر واحد فلوتاسیون روی کارخانه ایرانکوه با چگالی متوسط ۳/۳۴ (g/cm³) و دانه‌بندی که ۸۰ درصد ذرات دارای ابعاد زیر ۷۵ میکرون هستند، به عنوان خوراک ورودی به ستون استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های شناسایی از جمله XRD و جذب اتمی نشان داد که نمونه حاوی اسفالریت، گالن، پیریت، دولومیت و کوارتز است و عیار سرب و روی به ترتیب برابر با ۲/۹٪ و ۳۷/۵٪ است.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- نتایج آنالیز واریانس

نتایج آزمایش‌ها (جدول ۲) وارد نرم افزار طراحی آزمایش DX7 (Design Expert 7) شد و مورد بررسی قرار گرفت.

آنالیز واریانس جهت غربال نمودن پارامترها مطابق با اهمیت یا معنادار بودن اثرشان روی پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنالیز واریانس، تکنیکی است که از آزمایش‌هایی براساس نسبت‌های واریانس، جهت تعیین معنادار بودن یا نبودن اختلاف‌های موجود بین میانگین‌های چند گروه از مشاهدات استفاده می‌شود (هر یک از گروه‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند). آنالیز واریانس در واقع، براساس نسبت واریانس‌هایی که در روش فیشر استفاده می‌شود، استوار است [۱۷]. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که تمام پارامترهای عملیاتی در سطح اطمینان ۹۵٪ (مقادیر P کمتر از ۰/۰۵) در تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی معنادار هستند (جدول ۳). با توجه به مقادیر F و P مربوط به هر یک از فاکتورهای اصلی مشخص شد که مؤثرترین پارامترها (مقدار P کمتر و مقدار F بالاتر) در تعیین ماندگی گاز و دانسیته ناحیه جمع آوری، نرخ آب شستشو و ارتفاع کف، و بر دانسیته ناحیه کف، نرخ خوراک و نرخ آب شستشو است.

۲-۳- طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق چهار عامل نرخ جریان خوراک، نرخ آب شستشو، نرخ هوا و ارتفاع کف به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند و سه عامل ماندگی گاز، دانسیته ناحیه کف و دانسیته ناحیه جمع‌آوری به عنوان پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که چون در کارخانه باما در مرحله کلینر روی واکنشگری اضافه نمی‌شود، این عامل بررسی نشده است. سطوح هر یک از این پارامترها با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف [۳، ۵، ۱۳، ۱۴ و ۱۵] و بررسی‌های اولیه انجام شده، محدودیت‌های عملیاتی ستون آزمایشگاهی و خصوصیات ماده معدنی، در محدوده رژیم جریان حبابی تعیین شد [۱۶]. متغیرهای ورودی و سطوح آنها در طراحی آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، با استفاده از روش CCD، تعداد ۲۱ آزمایش شامل ۵ تکرار نقطه مرکزی، ۸ نقطه حقیقی و ۸ نقطه محوری طراحی شد.

۲-۴- روش انجام آزمایش‌ها

جدول ۱: پارامترهای عملیاتی و سطوح آنها

علامت	نام عامل	واحد	محوری پایین (-α= -1.68)	سطح پایین (-1)	مرکزی (0)	سطح بالا (+1)	محوری بالا (+α=+1.68)
A	ارتفاع کف	cm	۳۸/۱۸	۴۵	۵۵	۶۵	۷۱/۸۱
B	نرخ خوراک	cm/s	۰/۲	۰/۳۹	۰/۶۵	۰/۹۱	۱/۰۶۶
C	نرخ آب شستشو	cm/s	۰/۰۶	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵
D	نرخ هوا	cm/s	۰/۶۵	۰/۷۸	۱/۰۴	۱/۳	۱/۴۳

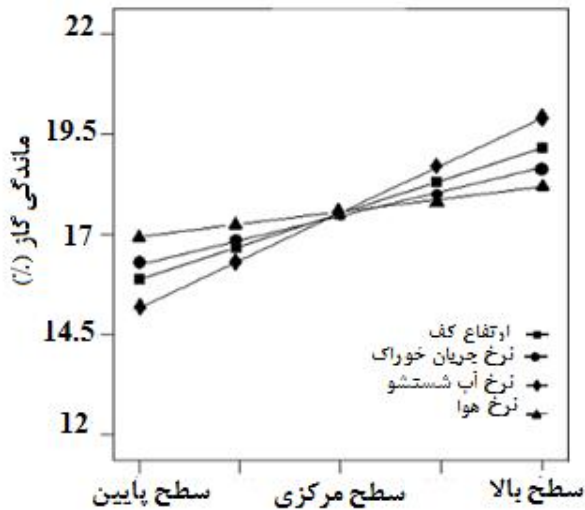
جدول ۲: آزمایش های طراحی شده و پاسخ های متناظر با آنها

std	اجرا	نوع نقطه	A	B	C	D	ماندگی گاز (%)	دانسیتته ناحیه جمع آوری (g/cm ³)	دانسیتته ناحیه کف (g/cm ³)
۹	۱	محوری	۳۸/۱۸	۰/۶۵	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۲/۳	۰/۸۸	۰/۴۱
۱	۲	حقیقی	۶۵	۰/۹۱	۰/۲	۰/۷۸	۲۲	۰/۷۷	۰/۴۴
۱۴	۳	محوری	۵۵	۰/۶۵	۰/۲۵	۱/۰۴	۲۱/۲	۰/۷۸	۰/۴۹
۱۶	۴	محوری	۵۵	۰/۶۵	۰/۱۵	۱/۴۳	۱۹/۹۶	۰/۸۲	۰/۴۲
۲	۵	حقیقی	۶۵	۰/۹۱	۰/۱	۰/۷۸	۱۳/۶۲	۰/۹۳	۰/۳۹
۵	۶	حقیقی	۶۵	۰/۳۹	۰/۱	۱/۳	۱۷/۶	۰/۸۷	۰/۲۹
۱۷	۷	مرکزی	۵۵	۰/۶۵	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۷/۲۱	۰/۸۴	۰/۳۳
۸	۸	حقیقی	۴۵	۰/۳۹	۰/۱	۰/۷۸	۱۲/۰۳	۰/۹۵	۰/۴۵
۱۹	۹	مرکزی	۵۵	۰/۶۵	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۵/۸	۰/۸۴	۰/۳۵
۱۱	۱۰	محوری	۵۵	۰/۲	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۴/۳	۰/۹۴	۰/۵
۲۰	۱۱	مرکزی	۵۵	۰/۶۵	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۵/۳۷	۰/۸۴	۰/۳۳
۱۳	۱۲	محوری	۵۵	۰/۶۵	۰/۰۶	۱/۰۴	۱۲/۹۶	۰/۹۳	۰/۳۱
۲۱	۱۳	مرکزی	۵۵	۰/۶۵	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۷/۶۷	۰/۸۴	۰/۳۲
۱۸	۱۴	مرکزی	۵۵	۰/۶۵	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۶/۲۳	۰/۸۴	۰/۳۴
۱۲	۱۵	محوری	۵۵	۱/۰۶	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۹/۵	۰/۷۸	۰/۲۵
۳	۱۶	حقیقی	۶۵	۰/۳۹	۰/۲	۱/۳	۲۰/۷۱	۰/۷۸	۰/۳۳
۶	۱۷	حقیقی	۴۵	۰/۳۹	۰/۲	۱/۷۸	۱۴/۴۲	۰/۹۱	۰/۵۳
۱۵	۱۸	محوری	۵۵	۰/۶۵	۰/۱۵	۰/۶۵	۱۶/۷	۰/۸۸	۰/۱۹
۴	۱۹	حقیقی	۴۵	۰/۹۱	۰/۱	۱/۳	۱۵	۰/۸۸	۰/۲۱
۷	۲۰	حقیقی	۴۵	۰/۹۱	۰/۲	۱/۳	۲۰/۶۶	۰/۸۳	۰/۴
۱۰	۲۱	محوری	۷۱/۸۱	۰/۶۵	۰/۱۵	۱/۰۴	۱۸/۶	۰/۷۴	۰/۲۸

جدول ۳: مقادیر F و P برای پارامترهای عملیاتی و برهم کنش آنها در تعیین پارامترهای پاسخ

فاکتور	ماندگی گاز		دانسیتته ناحیه جمع آوری		دانسیتته ناحیه کف	
	مقدار F	مقدار P	مقدار F	مقدار F	مقدار P	مقدار F
A	۲۱/۹۳	۰/۰۰۰۲	۱۶/۰۲	۰/۰۰۱	۸۳/۶۴	<۰/۰۰۰۱
B	۱۰/۱۷	۰/۰۰۵۷	۱۰/۵۲	۰/۰۰۵۱	۱۳۹/۱۹	<۰/۰۰۰۱
C	۴۸/۶۲	<۰/۰۰۰۱	۲۶/۹۰	<۰/۰۰۰۱	۱۲۴/۸۰	<۰/۰۰۰۱
D	۱۳/۴۴	۰/۰۰۲۱	۷/۰۹	۰/۰۱	۷۳/۹۳	<۰/۰۰۰۱
AB	-	-	-	-	۳۱۲/۱۱	<۰/۰۰۰۱
AC	-	-	-	-	۱۹/۷۳	۰/۰۰۴۴
AD	-	-	-	-	۴۷/۶۳	۰/۰۰۰۵
BC	-	-	-	-	۸/۷۷	۰/۰۲۵۳
BD	-	-	-	-	۷/۲۲	۰/۰۳۶۲
CD	-	-	-	-	۶/۰۹	۰/۰۴۸۶
A ²	-	-	-	-	۴/۲۸	۰/۰۸۴۱
B ²	-	-	-	-	۲۴/۳۹	۰/۰۰۲۶
C ²	-	-	-	-	۴۸/۷۸	۰/۰۰۰۴
D ²	-	-	-	-	۲/۸۷	۰/۱۴۱۴

آزمایش دیگری افزایش یافته است) نیز به دلیل افزایش نرخ بایاس سبب ۳/۲۸٪ افزایش در ماندگی گاز شده است. با افزایش نرخ هوا، ماندگی گاز به دلیل افزایش مقدار حباب‌های هوا در ناحیه جمع‌آوری به طور خطی افزایش یافته است که نشان‌دهنده رژیم جریان حبابی در ستون است. افزایش نرخ خوراک نیز به دلیل افزایش نرخ ته ریز و در نتیجه نرخ بایاس سبب افزایش ماندگی گاز شده است (شکل ۳).

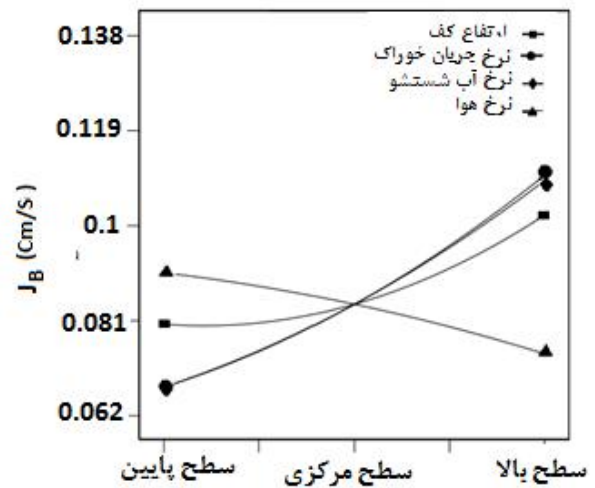


شکل ۳: اثر پارامترهای عملیاتی بر ماندگی گاز

همانطور که قبلاً گفته شد دانسیته ناحیه جمع‌آوری رابطه معکوس با ماندگی گاز دارد. بنابراین افزایش ارتفاع کف، نرخ آب شستشو، نرخ خوراک و نرخ هوا به دلیل افزایش ماندگی گاز سبب کاهش دانسیته ناحیه جمع‌آوری می‌شوند (شکل ۴).

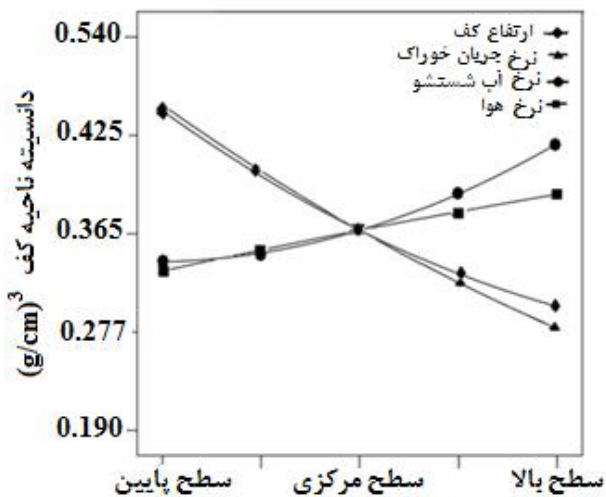
۳-۲- بررسی اثر پارامترهای عملیاتی

در شکل ۲ با در نظر گرفتن نرخ بایاس به عنوان پاسخ، تأثیر پارامترهای عملیاتی ستون بر این پارامترها جهت توجیه نحوه عملکرد پارامترهای هیدرودینامیکی ستون ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع کف به دلیل افزایش نرخ جریان باطله، نرخ بایاس افزایش یافته است. افزایش ارتفاع کف از ۴۵ تا ۵۵ cm نرخ بایاس به میزان کمی افزایش یافته اما با افزایش ارتفاع کف از ۵۵ تا ۶۵ cm نرخ بایاس افزایش قابل توجهی داشته است. با افزایش نرخ خوراک از ۰/۳۹ تا ۰/۹۱ cm/s به دلیل افزایش نرخ جریان ته ریز، نرخ بایاس به میزان ۰/۴۷ cm/s افزایش یافته است. افزایش نرخ آب شستشو نیز سبب افزایش نرخ بایاس شده است. همچنین افزایش نرخ هوا از ۰/۷۸ تا ۱/۳ cm/s به دلیل افزایش میزان آبی (پالپ) که از ناحیه جمع‌آوری به دنبال حباب‌ها به ناحیه کف راه یافته است، سبب کاهش نرخ آب بایاس به میزان ۰/۰۲ cm/s شده است.

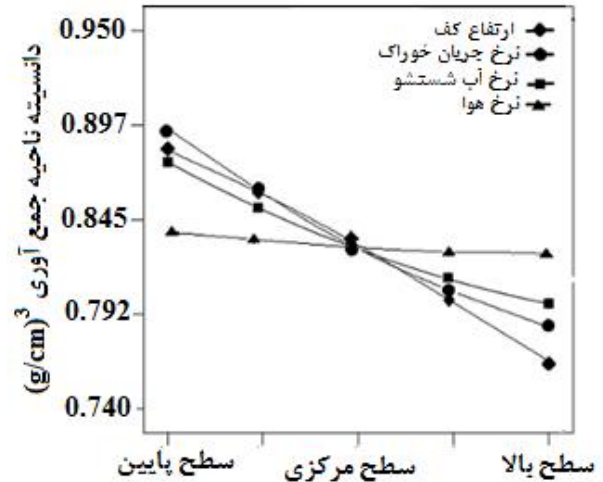


شکل ۲: اثر پارامترهای عملیاتی بر نرخ بایاس

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، با افزایش نرخ آب شستشو از ۰/۱ تا ۰/۲ cm/s، نرخ بایاس افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت حرکت رو به بالای حباب‌ها در ناحیه جمع‌آوری کاهش یافته و ماندگی گاز به میزان ۴/۵۷٪ افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع کف از ۴۵ تا ۶۵ cm (در هر آزمایش ارتفاع کف ثابت نگه داشته شده است در حالی ارتفاع کف در مقایسه با



شکل ۵: اثر پارامترهای عملیاتی بر دانسیته ناحیه کف

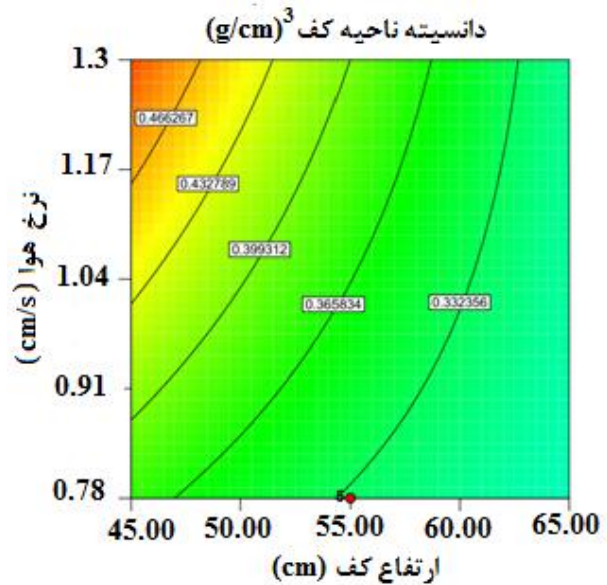


شکل ۶: اثر پارامترهای عملیاتی بر دانسیته ناحیه جمع آوری

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، برهم‌کنش بین متغیرها اثرات قابل توجهی بر دانسیته ناحیه کف دارد. به همین دلیل اثرات متقابل پارامترها بر دانسیته ناحیه کف مورد بحث قرار می‌گیرد. در شکل ۶ نمودار کنترلی اثر متقابل نرخ هوا و ارتفاع کف به ازای مقادیر متوسط نرخ جریان خوراک و نرخ آب شستشو، بر دانسیته ناحیه کف نشان داده شده است. در نرخ هوا کمتر از $1/5 \text{ cm/s}$ غلظت آب خوراک در کف در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری کف به صفر نزدیک می‌شود [۵]. بنابراین به ازای تمام مقادیر نرخ هوا در محدوده مورد آزمایش ($1/3 \text{ cm/s} < J_g < 0/78 \text{ cm/s}$) با افزایش ارتفاع کف، دانسیته‌ی این ناحیه کاهش یافته است. اما کاهش دانسیته کف به ازای مقادیر بیشتر نرخ هوا به دلیل افزایش نفوذ آب خوراک در این ناحیه بیشتر است. همچنین به ازای مقادیر بیشتر ارتفاع کف ($60-65 \text{ cm}$)، افزایش نرخ هوا به دلیل کم بودن نسبت حجم آب خوراک (پالپ) نفوذ کرده در کف به حجم ناحیه کف، اثر محسوسی بر دانسیته ناحیه کف نداشته است اما به ازای مقدار کمینه ارتفاع کف افزایش نرخ هوا سبب افزایش دانسیته این ناحیه شده است. بنابراین زمانی که هدف جلوگیری از راه یافتن ذرات باطله ای که به دنبال حباب صعود کرده اند به سرریز باشد، به کار بردن کف با عمق بیشتر ($60-65 \text{ cm}$) در نرخ هوا بالا ($1/3 \text{ cm/s}$) مناسب است.

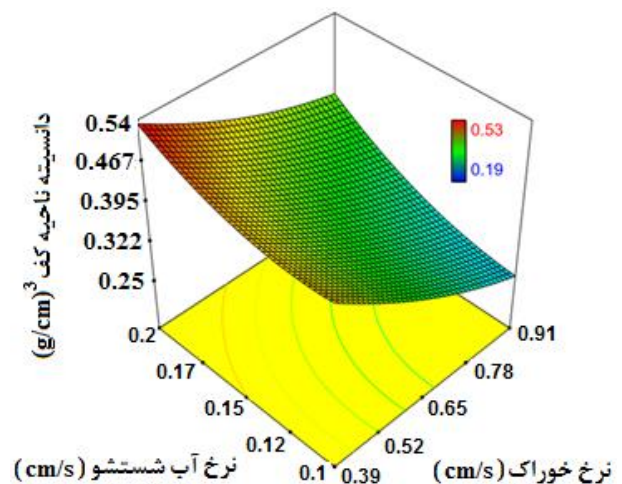
تغییرات دانسیته ناحیه کف بر اساس تغییرات پارامترهای عملیاتی در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش نرخ آب شستشو از $0/1$ تا $0/2 \text{ cm/s}$ به دلیل افزایش نسبت آب به هوا در ناحیه کف، ماندگی گاز در این ناحیه کاهش می‌یابد، در نتیجه دانسیته کف به میزان $0/1 \text{ g/cm}^3$ افزایش یافته است. با افزایش نرخ آب شستشو از $0/1$ تا $0/15 \text{ cm/s}$ دانسیته کف به میزان کمی افزایش یافته اما با افزایش نرخ آب شستشو تا $0/2 \text{ cm/s}$ دانسیته کف به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. با افزایش ارتفاع کف از 45 تا 65 cm ماندگی گاز در ناحیه جمع آوری کاهش یافته و این امر سبب کاهش بازیابی ذرات و کاهش انتقال ذرات به ناحیه کف شده که این موضوع با افزایش ماندگی گاز در ناحیه کف و در نتیجه کاهش دانسیته این ناحیه به میزان $0/14 \text{ g/cm}^3$ همراه است. همچنین به ازای افزایش ارتفاع کف از 60 تا 65 cm شیب نمودار کمتر از محدوده 45 تا 60 cm است و دانسیته کف به علت نزدیک شدن سطح مشترک به محل ورود خوراک و در نتیجه انتقال ذرات غیر انتخابی به ناحیه کف به میزان کمتری کاهش یافته است. با افزایش نرخ هوا به دلیل افزایش میزان آبی که از ناحیه جمع‌آوری به دنبال حباب‌ها به ناحیه کف راه یافته است، دانسیته ناحیه کف تقریباً به طور خطی افزایش می‌یابد. با افزایش نرخ خوراک از $0/39$ تا $0/91 \text{ cm/s}$ به دلیل کاهش زمان ماند در ناحیه جمع‌آوری، احتمال اتصال ذره به حباب کاهش یافته و ماندگی گاز در ناحیه کف افزایش می‌یابد، از اینرو دانسیته این ناحیه به میزان $0/17 \text{ g/cm}^3$ کاهش یافته است.

در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ اثر نرخ خوراک، نرخ آب شستشو، نرخ هوا و ارتفاع کف به ترتیب بر عیار، بازیابی و کارایی جدایش نشان داده شده است. افزایش ارتفاع کف و نرخ آب شستشو به دلیل افزایش نرخ بایاس (شکل ۲) منجر به کاهش ماندگی گاز در ناحیه جمع‌آوری شده (شکل ۳) در نتیجه بازیابی کاهش یافته، و به دلیل افزایش بازگشت ذرات آبدوست از کف به ناحیه جمع‌آوری، عیار و کارایی جدایش افزایش یافته اند. به ازای حداکثر ارتفاع کف (۶۵ cm) بیشترین کارایی جدایش روی برابر با ۳۹/۹۷٪ به دست آمد. همچنین بیشترین کارایی جدایش روی در نرخ آب شستشو ۰/۲ cm/s برابر با ۳۹/۴۱٪ به دست آمد. با افزایش نرخ خوراک به منظور ثابت نگه‌داشتن ارتفاع کف، نرخ ته ریز افزایش یافته، از اینرو سبب افزایش نرخ بایاس شده (شکل ۲) و به دلیل کاهش زمان ماند در ناحیه جمع‌آوری احتمال اتصال ذره به حباب کاهش یافته و در نتیجه بازیابی روی کاهش، عیار و کارایی جدایش آن افزایش یافته است. در نتیجه همانطور که در شکل ۵ و ۹ مشاهده می شود با افزایش نرخ خوراک کاهش دانسیته کف با کاهش بازیابی همراه است. بیشترین کارایی جدایش روی در ۰/۹۱ cm/s نرخ خوراک برابر با ۳۹/۷٪ به دست آمد. از طرفی افزایش نرخ هوا به دلیل افزایش صعود ذرات در ناحیه پشت سر حباب، سبب افزایش بازیابی و کاهش عیار و کارایی جدایش روی شده است. در نتیجه هنگامی که افزایش دانسیته ناحیه کف در اثر افزایش نرخ هوا باشد می تواند با افزایش بازیابی همراه باشد. افزایش نرخ هوا از ۱/۰۴ تا ۱/۳ cm/s اثر محسوسی بر عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی نداشته است. همچنین به ازای نرخ هوا ۰/۷۸ cm/s بیشترین مقدار عیار و کارایی جدایش روی به ترتیب برابر ۵۰/۱٪ و ۴۰/۵۴٪ به دست آمده است.



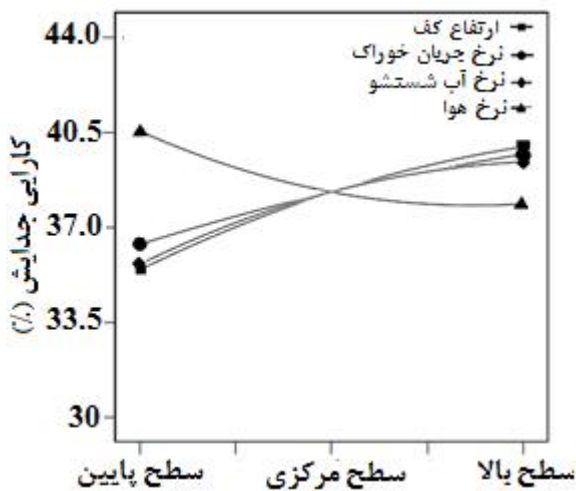
شکل ۶: نمودار کننتوری اثر متقابل نرخ گازدهی و ارتفاع کف بر دانسیته ناحیه کف ($Q_F=0.65\text{cm/s}$, $Q_W=0.15\text{cm/s}$)

دانسیته کف به ازای مقدار بیشینه نرخ آب شستشو و کمینه نرخ جریان خوراک به دلیل افزایش نسبت آب به هوا در ناحیه کف و نیز کاهش ماندگی گاز در این ناحیه حداکثر و در شرایط عکس حداقل است. افزایش همزمان نرخ خوراک و نرخ آب شستشو سبب کاهش اندکی در دانسیته کف شده است. یعنی اثر نرخ جریان خوراک بر دانسیته کف بیشتر از نرخ آب شستشو است (شکل ۷).

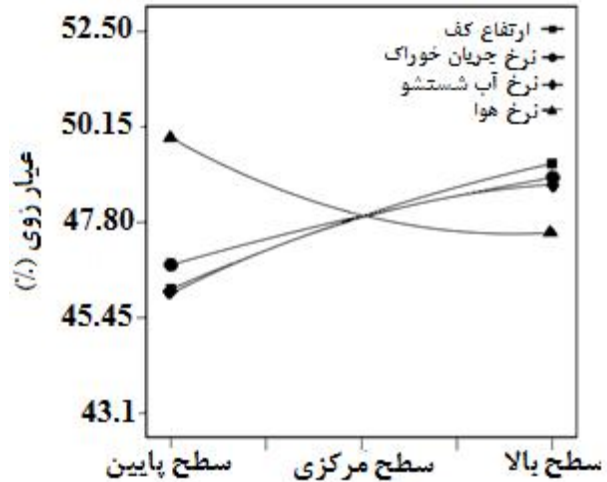


شکل ۷: اثر متقابل نرخ جریان خوراک و نرخ آب شستشو بر دانسیته کف ($H_F=55\text{cm}$, $Q_g=1.04\text{cm/s}$)

۳-۳- تأثیر پارامترهای عملیاتی و هیدرودینامیکی بر عملکرد متالورژیکی ستون



شکل ۱۰: اثر پارامترهای عملیاتی بر کارایی جدایش روی

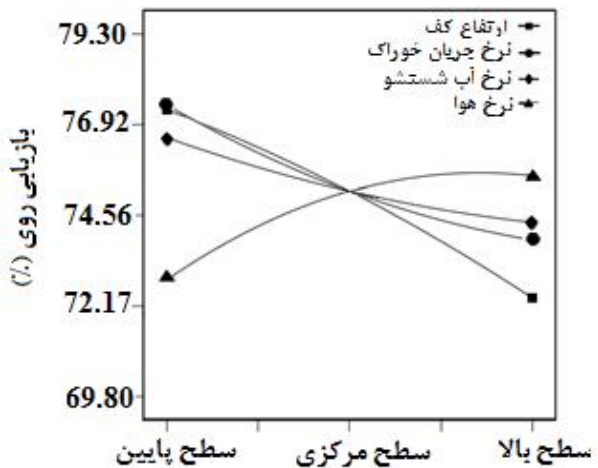


شکل ۸: اثر پارامترهای عملیاتی بر عیار روی

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که نرخ آب شستشو و ارتفاع کف به ترتیب با مقادیر P کمتر و مقدار F بالا نسبت به سایر پارامترها مؤثرترین فاکتورها بر میزان عیار و کارایی جدایش روی هستند. همچنین برای بازیابی روی، ارتفاع کف و نرخ خوراک تأثیرگذارترین فاکتورها بوده‌اند.

۳-۴- ارائه مدل‌ها

با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها بهترین مدل برای پارامترهای پاسخ در نرم افزار طراحی آزمایش DX انتخاب شد. مدل‌های به دست آمده برای هر یک از متغیرهای پاسخ در روابط (۷) تا (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹: اثر پارامترهای عملیاتی بر بازیابی روی

$$(۷) \quad \text{ماندگی گاز (\%)} = -7.8 + 0.164A + 1.117B + 12.39C + 1.34D$$

$$(۸) \quad \text{دانسیتة ناحیه جمع آوری (g/cm³)} = +1.326 - 0.003A - 0.027B - 0.0219C - 0.0232D$$

$$(۹) \quad \text{دانسیتة ناحیه کف (g/cm³)} = +1.288 - 0.021A - 0.946B + 0.398C + 0.45D + 0.015AB - 0.011AC + 0.075BC - 0.005AD - 0.021BD + 0.062CD + 0.018B^2 + 0.67C^2$$

مدل‌های ارائه شده، تنها ۰/۰۱٪ احتمال وجود دارد که معنادار بودن مدل‌ها در اثر خطای آزمایش بوده باشد (جدول ۴). بررسی نمودار مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در مقابل مقادیر حقیقی مناسب بودن برازش مدل‌ها را تأیید می‌کند.

پارامترهای مدل در جدول ۳ معرفی شده‌اند و AC، AB، BC، CD، BD و AD برهم‌کنش بین پارامترهای اصلی هستند. این مدل‌ها، در گروه مدل‌های تجربی قرار می‌گیرند و در نتیجه محدوده اعتبار آنها، سطوح در نظر گرفته شده برای پارامترهای عملیاتی است.

نتایج آنالیز واریانس مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که مدل‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار هستند و در تمامی

جدول ۴: نتایج آنالیز واریانس مربوط به مدل‌های ساخته شده

مقدار F	مقدار P	درجه آزادی	میانگین مربعات	مجموع مربعات	پاسخ
۲۳/۵۲	<۰/۰۰۰۱	۴	۳۹/۵۳	۵۸/۱۲	مدل
		۱۶	۱/۶۸	۲۶/۸۹	باقیمانده
۱۵/۳۴	<۰/۰۰۰۱	۴	۰/۰۱۴	۰/۰۵۸	مدل
		۱۶	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۵	باقیمانده
۵۸/۹۲	<۰/۰۰۰۱	۱۴	۰/۰۱۲	۰/۱۷	مدل
		۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱۲	باقیمانده

جدول ۵: نتایج آزمایش‌های اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده

شماره آزمایش‌ها				پارامترها
۳	۲	۱		
۶۵	۵۰	۶۰	A	ارتفاع کف (cm)
۳/۴۵	۲	۳	B	نرخ خوراک (L/min)
۰/۶۵	۰/۷	۰/۵	C	نرخ آب شستشو (L/min)
۳	۴/۵	۳/۵	D	نرخ هوا (L/min)
۱۹	۱۷/۳	۱۶/۳۲	آزمایش	ماندگی گاز (%)
۱۸/۸۹	۱۷/۳۶	۱۶/۳۸	مدل	
۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۵	آزمایش	دانسیته ناحیه جمع‌آوری (g/cm ³)
۰/۸	۰/۸۵	۰/۸۴	مدل	
۰/۱۳	۰/۴۷	۰/۱۱	آزمایش	دانسیته ناحیه کف (g/cm ³)
۰/۱۳	۰/۴۸	۰/۱	مدل	

۴- نتیجه گیری

- روش CCD به دلیل بررسی برهم‌کنش پارامترهای عملیاتی و تعیین رفتار انحنای پارامترهای پاسخ، نسبت به سایر روش‌های طراحی آزمایش برای بررسی

۳-۴- اعتبارسنجی مدل‌ها

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده، سه آزمایش در محدوده سطوح پارامترهای عملیاتی انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان‌دهنده‌ی صحت مدل‌های ارائه شده برای هر یک از این پارامترهای عملیاتی با استفاده از روش CCD است (جدول ۵).

با توجه به این مطلب که مدل‌های ارائه شده به روش سطح-پاسخ، از جمله مدل‌های تجربی غیرسینتیکی هستند (با سینتیک فلوتاسیون ارتباطی ندارند) که برای محدوده‌ی مورد آزمایش متغیرهای ورودی کاربرد دارند و قابلیت برون‌یابی ندارند امکان تعمیم این مدل‌ها برای فلوتاسیون ستونی سایر کانیه‌ها نیست. اما امکان تعمیم نتایج به دست آمده در مورد تأثیر پارامترهای عملیاتی بر پارامترهای هیدرودینامیکی و متالورژیکی در فلوتاسیون ستونی سایر کانیه‌ها در محدوده جریان حبابی وجود دارد.

[۳]. Hacifazlioglu, H., Sutcu, H. ; 2007; "Optimization of some parameters in column flotation and a comparison of conventional cell and column cell in terms of flotation performance", Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers(38), pp.287-293.

[۴]. Jena, M.S., Biswal, S.K. , Das, S.P., Reddy, P.S.R.;2008;"Comparative study of the performance of conventional and column flotation when treating coking coal fines ", Fuel Processing Technology, pp. 1409-1415.

[۵]. Finch, J.A and Dobby, G.S.;1990; *Column Flotation*. Oxford : Pergamon Press.

[۶]. Montgomery, D. C.; 2001; "Design and analysis of experiments", New York : John Wiley & Sons.

[۷]. Aghaie, E., Pazouki, M., Hosseini, M.R., Ranjbar, M. and Ghavipankeh, F.;2008;"Response Surface Methodology (RSM) analysis of organic acid production for kaolin beneficiation by *Aspergillus niger*", Chemical Engineering Journal, No147, pp. 17-28.

[۸]. Anderson, M. J. , Whitcomb P.J.;2000; "DOE simplified: Practical Tools for Effective Experimentation".

[۹]. Aslan, N., Cifci, A. and Yanb, D.;2008; "Optimization of process parameters for producing graphite concentrate using response surface methodology", Separ. Purif. Technol, No 59, pp. 9-16.

[۱۰]. Ekinci, Z., Sayan, E., Bese, A. V. and Nuri Ata, O.;2007;"Optimization and modeling of boric acid extraction from colemanite in water saturated with carbon dioxide and sulphur dioxide gases", Int. J. Miner. Process. pp. 187-194.

[۱۱]. Mehrabani, J. V., Noaparast, M., Mousavi, S. M., Dehghan, R. and Ghorbani, A.;2010;"Process optimization and modeling of sphalerite flotation from a low -grade Zn-Pb ore using response surface methodology", Separ. Purif. Techno, No 72, pp. 242-249.

[۱۲]. Tuteja, R. K., Spottiswood, D. J. and Misra, V. N.; 1994; "Mathematical models of the column flotation process : A review"; Minerals Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 1459-1472.

[۱۳]. Bergh, L.G. and YIANATOS, J.B. ; 1994; "Experimental Studies on Flotation Column Dynamics", Minerals Engineering, No.7, pp. 345-355.

[۱۴]. Neethling, S.J., et al, cell, ;2006; "The use of FrothSim to optimize the water addition to a column flotation", Minerals Engineering, No.19, pp.816-823.

پارامترهای هیدرودینامیکی فرآیند فلوتاسیون ستونی مفیدتر است.

- مدل خطی برای دانسیته ناحیه جمع‌آوری و ماندگی گاز و مدل درجه دوم برای دانسیته ناحیه کف براساس پارامترهای عملیاتی ارائه شد.
- نرخ آب شستشو و ارتفاع کف برای دانسیته ناحیه جمع‌آوری و ماندگی گاز مؤثرترین فاکتورها و در تعیین دانسیته‌ی ناحیه کف، نرخ خوراک و نرخ آب شستشو به ترتیب مؤثرترین فاکتورها بوده‌اند.
- به ازای افزایش نرخ آب شستشو از ۰/۱-۰/۲ (cm/s)، ماندگی گاز از ۰/۱۵/۰۱٪ به ۰/۱۹/۹۷٪ و دانسیته ناحیه جمع‌آوری از ۰/۸۸ به ۰/۷۹ (g/cm³) رسید.
- همچنین با افزایش ارتفاع کف از ۴۵ تا ۶۵ cm، ماندگی گاز از ۰/۱۵/۸۵٪ به ۰/۱۹/۱۳٪ افزایش و دانسیته ناحیه جمع‌آوری از ۰/۸۶ به ۰/۸۱ (g/cm³) کاهش یافت.
- به ازای افزایش نرخ خوراک از ۰/۳۹-۰/۹۱ (cm/s) دانسیته ناحیه کف از ۰/۴۷ به ۰/۳ (g/cm³) کاهش یافت و با افزایش نرخ آب شستشو از ۰/۱-۰/۲ (cm/s)، دانسیته ناحیه کف از ۰/۳۴ به ۰/۴۴ (g/cm³) رسید.
- افزایش همزمان نرخ خوراک و نرخ آب شستشو سبب کاهش اندکی در دانسیته‌ی ناحیه کف می‌شود.
- افزایش همزمان ارتفاع کف و نرخ هوا سبب کاهش دانسیته‌ی ناحیه کف می‌شود.
- نرخ آب شستشو و ارتفاع کف برای عیار روی و کارایی جدایش مؤثرترین فاکتورها بوده‌اند. در مورد بازیابی روی، نرخ خوراک و ارتفاع کف مؤثرتر بوده‌اند. در کل، افزایش نرخ آب شستشو، خوراک و ارتفاع کف سبب افزایش کارایی جدایش و افزایش نرخ هوادهی سبب کاهش کارایی جدایش روی شده است.

منابع

[۱]. Satish, C.S., Kundu, G., Mukherjee, D.; 2010; "Study of gas holdup and pressure characteristics in a column flotation cell using coal", Minerals Engineering, No.23, pp.636-642.

[۲]. Yianatos, J.B. and Levy, A.R.; 1989; *Estimation of Gas Holdup, Diameter and Apparent Density of Mineralised Bubbles in Industrial Flotation Columns*, Int. Colloquium Dev. in Froth Flotation, S.A.I.M.M., Western Cape Branch, South Africa, August.

سولفیدی کارخانه باما. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کاشان.

[۱۷]. Lazic, R.; 2004; *Design of Experiments in Chemical Engineering*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

[۱۵]. Uribe-Salas, A., et al. ;2007; "*Operating Parameters that affect the carrying capacity of column flotation of a zinc sulfide mineral*", *Minerals Engineering*, pp.710-715.

[۱۶]. دارابی، حسنا؛ (۱۳۹۱)؛ بررسی امکان جایگزینی سلول مکانیکی با سلول ستونی در مرحله کلینر فلوتاسیون روی