

طراحی سلول‌های ستونی مرحله شستشوی روی برای کارخانه ایرانکوه

علی اکبر عبدالله زاده^{۱*}، حسنا دارابی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، Aabd Zad@kashanu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، Darmine84@gmail.com

(دریافت ۲۳ مهر ۱۳۹۱، پذیرش ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۲)

چکیده

با توجه به مزایای سلول‌های فلوتاسیون ستونی نسبت به سلول‌های مکانیکی و رویکرد جهانی صنایع فرآوری مواد معدنی برای جایگزین کردن سلول‌های ستونی به جای مکانیکی، در این تحقیق ابتدا امکان جایگزینی سلول‌های مکانیکی مرحله شستشوی روی کارخانه باما با سلول ستونی با انجام آزمایش‌هایی با استفاده از ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی به قطر ۱۰ و ارتفاع ۴۰۰ سانتیمتر بررسی شده است. به همین منظور ۲۱ آزمایش با استفاده از روش طراحی آزمایش (Central Composite Design) CCD با در نظر گرفتن چهار عامل ارتفاع کف، دبی بار ورودی، دبی آب شستشو و دبی هوادهی به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند و سه عامل عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی به عنوان پاسخ، طراحی شد. پس از بررسی اثر متغیرهای فرآیند بر پاسخها، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی با هدف بیشینه کردن کارایی جدایش روی انجام شد. در شرایط بهینه ارتفاع کف، دبی بار ورودی، دبی آب شستشو و دبی هوادهی به ترتیب برابر با ۶۵ سانتیمتر، ۳/۴۵، ۰/۶۵ و ۳ Lit/min و کارایی جدایش برابر با ۴۳/۹۴٪ به دست آمد. نتایج آزمایش در شرایط بهینه نشان داد که استفاده از سلول ستونی می‌تواند سبب ۳/۶۲٪ افزایش در عیار و ۲/۲۲٪ افزایش در بازیابی روی شده و کارایی جدایش نیز به مقدار ۴/۷۵٪ افزایش یابد. سپس با استفاده از این داده‌ها و روش بزرگ مقیاس کردن فینچ و دابی، یک سلول ستونی به قطر ۲ و ارتفاع ۱۲ متر که توسط تیغه‌گذاری به چهار قسمت تقسیم شده بود برای مرحله اولیه روی کارخانه باما طراحی شد که می‌تواند جایگزین چهار مرحله سلول‌های مکانیکی اولیه و شستشوی مجدد موجود شود.

کلمات کلیدی

فلوتاسیون ستونی، کارخانه باما، بزرگ نمایی، روش CCD، سینتیک فلوتاسیون

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

برخی مطالعات دیگر مشخص شده که با وجود افزایش عیار، کاهش بازیابی آشکار نیست [۸]، [۱۰]، [۱۲]. تأثیر ضخامت کف بر عملکرد فلوتاسیون مشابه دبی آب شستشو است. با افزایش ضخامت کف، عیار افزایش و بازیابی کاهش می‌یابد [۱۰]، [۱۲].

در این تحقیق ابتدا امکان جایگزینی سلول‌های مکانیکی مرحله شستشو روی باما با سلول فلوتاسیون ستونی بررسی شده است. به همین منظور، پس از انجام آزمایش‌های امکان‌سنجی، مدلسازی و بهینه‌سازی فلوتاسیون ستونی کنسانتره روی با استفاده از روش طراحی آزمایش CCD انجام شد. سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش انجام شده در شرایط بهینه، طراحی سلول ستونی برای مرحله شستشوی روی انجام شده است.

۱-۱- بزرگ مقیاس کردن ستون

داده‌های مورد نیاز برای بزرگ مقیاس کردن ستون را می‌توان با ستون‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه صنعتی به دست آورد. فرآیند فلوتاسیون در ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی و نیمه صنعتی از مدل جریان پیستونی و در ستون‌های صنعتی از مدل جریان محوری پیروی می‌کند. پارامترهای زمان ماند ذرات و ثابت سینتیک فلوتاسیون در این دو مدل مشابه است. بنابراین، با اندازه‌گیری این پارامترها در ستون‌های آزمایشگاهی، می‌توان مقادیر آن‌ها را برای ستون‌های صنعتی به کار برد [۱۴]، [۱۵]. مراحل بزرگ‌نمایی ستون توسط فینچ و دابی ارائه شده است [۲].

در مرحله اول، تعداد ستون (N)، قطر (d_c) و ارتفاع ناحیه جمع‌آوری (H_c) با توجه به موارد صنعتی موجود انتخاب می‌شوند. مرحله دوم شامل محاسبه سرعت به سمت پایین پالپ (J_{sl}) بوده و پس از آن زمان ماند مایع یا پالپ (τ_{sl}) تعیین می‌شود. مرحله چهارم شامل محاسبه سرعت نسبی ذره (U_{sp}) است. در مراحل پنجم و ششم به ترتیب زمان ماند ذره (τ_p) و ضریب پراکندگی محوری (N_d) محاسبه می‌شود. مرحله هفتم شامل محاسبه بازیابی با استفاده از مدل جریان محوری و مرحله هشتم شامل محاسبه مقدار بازیابی وزنی و مقایسه آن با مقدار اولیه است که در صورت اختلاف با مقدار جدید R_{mass} ، محاسبه‌ها از مرحله دوم تکرار می‌شود. در مرحله نهم در صورت عدم دستیابی به بازیابی مورد نظر تعداد ستون تغییر داده می‌شود و محاسبات از مرحله اول تکرار می‌شود [۲].

سلول‌های ستونی یکی از جدیدترین و موفق‌ترین انواع سلول‌های فلوتاسیون در چند دهه اخیر است. در این سلول‌ها برای هم‌زدن پالپ و متفرق کردن ذرات جامد و آن‌ها هوا از وسیله مکانیکی استفاده نمی‌شود و از نظر نحوه توزیع هوا، باردهی و آب شستشو، نسبت به سلول‌های مکانیکی برتری-هایی دارند که باعث عملکرد متالورژیکی بهتر آن‌ها بخصوص در مرحله شستشو شده و از میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی تا حد زیادی می‌کاهد. همچنین قابلیت کنترل و اتوماسیون بهتری را ایجاد می‌کند [۱]. از این‌رو از سلول‌های فلوتاسیون ستونی در مدار فلوتاسیون بسیاری از کارخانه‌های فرآوری جهان برای فرآوری اکثر مواد معدنی از جمله زغالسنگ، مس، مولیبدن، سرب، روی و حتی مرکب زدایی از کاغذهای باطله استفاده شده است. در برخی از کارخانه‌های فرآوری ایران مانند کارخانه‌های مجتمع مس سرچشمه، مس میدوک، مس سونگون و زغال سنگ طبس نیز از این سلول‌ها استفاده شده است.

در فلوتاسیون ستونی اغلب بار ورودی در فاصله یک سوم از بالای ستون وارد می‌شود و هنگام پایین رفتن در مقابل انبوه آن‌ها تولید شده توسط حباب‌ساز قرار می‌گیرد. حباب‌ها ذرات قابل شناور شدن را جمع‌آوری می‌کنند. به همین دلیل به این منطقه از ستون ناحیه جمع‌آوری می‌گویند. ذرات جمع شده به ناحیه شستشو منتقل و در معرض آب شستشو قرار می‌گیرند. در این ناحیه ذرات آبران بهمراه حباب‌ها به بخش سرریز ستون و ذرات آبدوست نیز به انتهای ستون منتقل شده و از ته ریز خارج می‌شوند [۲]. دبی هوا (هوادهی)، دبی بار ورودی، دبی آب شستشو، ضخامت کف و مقدار مصرفی معرف‌ها مهم‌ترین پارامترهایی هستند که عملکرد فلوتاسیون ستونی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به منظور بررسی نحوه تأثیر این پارامترها مطالعات متعددی توسط محققین انجام شده است [۷] - [۳]. براین اساس مشخص شده که افزایش دبی هوادهی تا مقدار بهینه، تأثیر مثبت بر بازیابی دارد و پس از آن کاهش می‌یابد [۱۱] - [۸]. اما در مورد اثر دبی بار ورودی نتایج متفاوتی به دست آمده است. فینچ و دابی بیان کردند که با افزایش دبی بار ورودی زمان توقف در کف کاهش یافته و در نتیجه بازیابی افزایش می‌یابد [۲]. گودال و اوکانر ثابت کردند که عکس این موضوع می‌تواند امکان‌پذیر باشد [۱۲]. در مورد آب شستشو در بسیاری از مطالعات، مشاهده شده که با افزایش دبی آب شستشو عیار افزایش و بازیابی کاهش می‌یابد [۲]، [۱۳]. در

۳-۲- عملکرد سلول‌های مکانیکی شستشوی روی کارخانه

در واحد فلوتاسیون باما، کنسانتره رافر روی وارد چهار مرحله شستشو می‌شود. تعداد سلولها در هر یک از بانک‌های شستشو روی ۴ عدد است [۱۶]. برای مقایسه نتایج ستون فلوتاسیون با عملکرد سلول‌های مکانیکی، از سرریز (کنسانتره) و ته‌ریز (باطله) سلول‌های مکانیکی مرحله شستشو روی کارخانه نیز نمونه برداری و عیار روی در آنها با استفاده از روش جذب اتمی تعیین شد. سپس بازیابی و کارایی جدایش سلول‌های مکانیکی شستشو محاسبه شد (جدول ۱). کارایی جدایش با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است [۱۷]، [۱۸]:

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

که در آن f ، c و t به ترتیب عیار روی در بار ورودی، کنسانتره و باطله است.

جدول ۱: عملکرد سلول‌های مکانیکی شستشو روی کارخانه باما

جریان‌ها			مشخصات
باطله	کنسانتره	بار ورودی	
۲۴	۴۸/۷۵	۳۷/۵	عیار روی (%)
۷۰/۹			بازیابی روی (%)
۳۹/۱۹			کارایی جدایش (%)

۴-۲- روش انجام آزمایش‌ها

به منظور طراحی آزمایش‌های مورد نیاز برای تعیین شرایط بهینه عملیاتی فلوتاسیون ستونی به روش CCD، چهار عامل دبی بار ورودی، دبی آب شستشو، دبی هوادهی و ارتفاع کف، به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند و سه عامل عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی به عنوان پاسخ در نظر گرفته شدند. لازم بذکر است که چون در کارخانه در مرحله شستشو روی معرفی اضافه نمی‌شود در این آزمایش‌ها این عامل بررسی نشده است. سطوح هر یک از این پارامترها با توجه به مطالعات اولیه و محدودیت‌های عملیاتی ستون آزمایشگاهی تعیین شد [۱۶]. متغیرهای ورودی و سطوح آنها در طراحی آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با استفاده از روش CCD، تعداد ۲۱ آزمایش شامل ۵ تکرار نقطه مرکزی طراحی شد.

پس از تعیین تعداد ستون می‌توان آنها را با یک ستون با قطر بزرگ که توسط تیغه به چند قسمت (معادل تعداد ستون‌های محاسبه شده) تقسیم شده باشد جایگزین کرد. به این ترتیب ضمن کاهش فضای مورد نیاز با افزایش نسبت ارتفاع به قطر ستون مدل سینتیکی سیستم به مدل جریان پیستونی نزدیک شده که منجر به افزایش بازیابی می‌شود. رابطه قطر ستون جدید به صورت زیر است [۲]:

$$d_{c(design)} = d_{c(base)} \sqrt{N} \quad (1)$$

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی

آزمایش‌های امکان‌سنجی با استفاده از یک ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۴۰۰ سانتی‌متر انجام شده است. این سیستم فلوتاسیون ستونی شامل تانک ۱۰۰ لیتری بار ورودی، دو پمپ پرستالیک برای اندازه‌گیری و کنترل دقیق دبی بار ورودی و باطله و دو جریان‌سنج برای تنظیم دبی هوادهی و آب شستشو است. بار ورودی پس از آماده‌سازی در مخزن بار ورودی به‌وسیله پمپ با دبی مشخص از ارتفاع ۸۰ سانتی متری لبه بالایی ستون وارد می‌شود. این ستون مجهز به سیستم کنترل اتوماتیک و مونیتورینگ است و 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 کنترل عمق کف و محاسبه پارامترهای هیدرودینامیکی (ماندگی‌گاز، دانسیته ناحیه جمع آوری، دانسیته ناحیه کف) استفاده می‌شوند.

۲-۲- مشخصات کنسانتره رافر روی

به منظور بررسی عملکرد مدار شستشوی روی، مطالعات شناسایی شامل تعیین دانه‌بندی، عیار و کانی‌های موجود با پراش اشعه ایکس و تجزیه شیمیایی بر روی نمونه تهیه شده از کنسانتره رافر روی به عنوان بار ورودی ستون انجام شد. نتایج آنالیز XRD نشان داد که نمونه حاوی اسفالریت، گالن، پیریت، دولومیت و کوارتز است. این نمونه دارای چگالی متوسط ۳/۳۴ (g/cm³) است و ۸۰٪ ذرات دارای ابعاد زیر ۷۵ میکرون هستند.

شده و پاسخ‌های متناظر با هریک از آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

در تمام آزمایش‌ها، همان بار ورودی به سلول‌های مکانیکی شستشو کارخانه بامابا ۱۱ درصد وزنی جامد پس از تنظیم pH (در حدود ۸/۵) 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 اطمینان از پایداری جریان داخل ستول، از جریان‌های باطله و کنسانتره به طور همزمان نمونه گرفته شد. آزمایش‌های طراحی

جدول ۲: پارامترهای عملیاتی و سطوح آن‌ها

علامت	نام عامل	واحد	محوری پایین	سطح پایین	مرکزی	سطح بالا	محوری بالا
A	ارتفاع کف	cm	۳۸/۱۸	۴۵	۵۵	۶۵	۷۱/۸۱
B	دبی بار ورودی	L/min	۰/۸۲	۱/۵	۲/۵	۳/۵	۴/۱۷۱۸
C	دبی آب شستشو	L/min	۰/۳	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۰/۹۳۶۳
D	دبی هوادهی	L/min	۲/۵	۳	۴	۵	۵/۵

جدول ۳: آزمایش‌های طراحی شده و پاسخ‌های متناظر با آن و مقدار ماندگی گاز در این آزمایش‌ها.

std	اجرا	A	B	C	D	عیار روی (%)	بازیابی روی (%)	کارایی جدایش (%)	ماندگی گاز (%)
۹	۱	۳۸/۱۸	۲/۵	۰/۶	۴	۴۴/۷۵	۷۸/۱۱	۳۲/۹۱	۱۲/۳
۱	۲	۶۵	۳/۵	۰/۸	۳	۵۲/۵	۷۰/۰۹	۴۳/۴۲	۲۲
۱۴	۳	۵۵	۲/۵	۰/۹۵	۴	۴۸/۶	۷۳/۸۳	۳۹/۲۴	۲۱/۲
۱۶	۴	۵۵	۲/۵	۰/۶	۵/۵	۴۸	۷۴/۷۲	۳۸/۴۲	۱۹/۹۶
۲	۵	۶۵	۳/۵	۰/۴	۳	۵۰/۸۴	۷۸/۴۳	۴۲/۷۴	۱۳/۶۲
۵	۶	۶۵	۱/۵	۰/۴	۵	۴۳/۱۹	۷۴/۹	۳۰/۶۲	۱۷/۶
۱۷	۷	۵۵	۲/۵	۰/۶	۴	۴۷/۵	۷۵/۴۶	۳۷/۶۹	۱۷/۲۱
۸	۸	۴۵	۱/۵	۰/۴	۳	۴۵	۷۴/۵۲	۳۳/۷۹	۱۲/۰۳
۱۹	۹	۵۵	۲/۵	۰/۶	۴	۴۷/۸	۷۴/۹۳	۳۸/۱۴	۱۵/۸
۱۱	۱۰	۵۵	۰/۸۲	۰/۶	۴	۴۵/۹	۷۹/۲۶	۳۴/۸۳	۱۴/۳
۲۰	۱۱	۵۵	۲/۵	۰/۶	۴	۴۸/۰۹	۷۵/۳۸	۳۸/۵۷	۱۵/۳۷
۱۳	۱۲	۵۵	۲/۵	۰/۳	۴	۴۵/۲۷	۷۷/۲	۳۳/۹۶	۱۲/۹۶
۲۱	۱۳	۵۵	۲/۵	۰/۶	۴	۴۸	۷۵/۷۸	۳۸/۴۵	۱۷/۶۷
۱۸	۱۴	۵۵	۲/۵	۰/۶	۴	۴۷/۹۶	۷۵/۲	۳۸/۳۸	۱۶/۲۳
۱۲	۱۵	۵۵	۴/۱۷۱۸	۰/۶	۴	۴۹/۵	۷۳/۳۲	۴۰/۴۱	۱۹/۵
۳	۱۶	۶۵	۱/۵	۰/۸	۵	۴۵/۷	۷۹/۲۵	۳۴/۴۷	۲۰/۷۱
۶	۱۷	۴۵	۱/۵	۰/۸	۳	۵۰/۵۵	۷۲/۶۱	۴۱/۶۶	۱۴/۴۲
۱۵	۱۸	۵۵	۲/۵	۰/۶	۲/۵	۵۱/۵	۷۰/۶۴	۴۲/۴۴	۱۶/۷
۴	۱۹	۴۵	۳/۵	۰/۴	۵	۴۵/۹	۷۶	۳۵/۱۵	۱۵
۷	۲۰	۴۵	۳/۵	۰/۸	۵	۴۷/۹	۷۳/۱	۳۸/۲۲	۲۰/۶۶
۱۰	۲۱	۷۱/۸۱۷	۲/۵	۰/۶	۴	۴۹/۹۵	۶۹/۸۲	۴۰/۵۱	۱۸/۶

۳- نتایج و بحث

۳-۱ ساخت معادله مدل‌ها

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در نرم افزار طراحی آزمایش DX7 وارد شده و از میان مدل‌های موجود، بهترین مدل برای پارامترهای پاسخ انتخاب شد. مدل‌های به دست آمده برای هر یک از متغیرهای پاسخ در روابط (۳) تا (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این مدل‌ها جزء مدل‌های غیر

سینتیکی هستند و قابلیت برون‌یابی ندارند. در این مدل‌ها تمامی فاکتورها بصورت کددار هستند. پارامترهای مدل در جدول ۲ معرفی شده‌اند و AB، AC، BC، CD، BD و AD برهم کنش بین پارامترهای اصلی هستند.

نتایج آنالیز واریانس مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که مدل‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ (مقادیر P کمتر از ۰/۰۵) معنادار هستند (جدول ۴). مقدار بالای F و همچنین پایین بودن مقدار P، بیانگر معتبر بودن مدل‌های ارائه شده است.

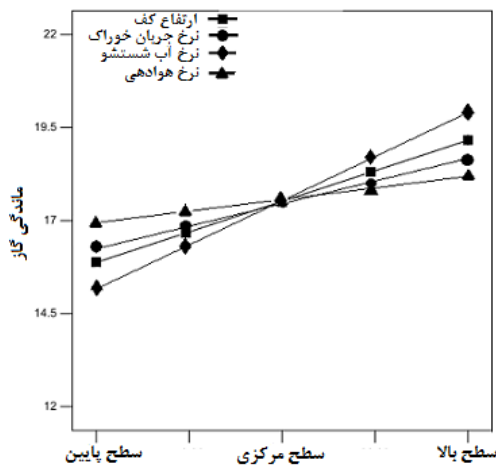
$$\text{Zn grade}(\%) = 47.96 + 1.55A + 1.55B + 1.34C - 1.17D + 0.86AB - 0.42AC - 0.52AD - 0.55BC + 1.19BD - 0.34CD - 0.26A^2 - 0.52C^2 + 0.73D^2 \quad (۳)$$

$$\text{Zn recovery}(\%) = 75.18 - 2.46A - 1.77B - 1.11C + 1.36D + 0.41AB - 1.13AD - 1.71BC - 3.27BD + 1.46CD - 0.33A^2 + 0.49B^2 - 0.96D^2 \quad (۴)$$

$$\text{Zn SE}(\%) = 38.31 + 2.26A + 1.66B + 1.88C - 1.34D + 1.56AB - 0.8AC - 0.71AD - BC + 1.96BD - 0.59A^2 - 0.27B^2 - 0.78C^2 + 0.9D^2 \quad (۵)$$

جدول ۴: نتایج آنالیز واریانس مدل‌های ساخته شده

مدل	مجموع مربعات		درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
	مدل	باقیمانده				
عیار روی (%)	مدل	۱۱۶/۶۴	۱۴	۸/۳۳	۶۳/۰۶	<۰/۰۰۰۱
	باقیمانده	۰/۷۹	۶	۰/۱۳		
بازیابی روی (%)	مدل	۱۴۶/۵۲	۱۴	۱۰/۴۷	۴۰/۲۱	<۰/۰۰۰۱
	باقیمانده	۱/۵۶	۶	۰/۲۶		
کارایی جدایش (%)	مدل	۲۴۳/۱۶	۱۴	۱۷/۳۷	۱۶۱/۱۲	<۰/۰۰۰۱
	باقیمانده	۰/۶۵	۶	۰/۱۱		



شکل ۱: تأثیر پارامترهای عملیاتی ستون بر ماندگی گاز.

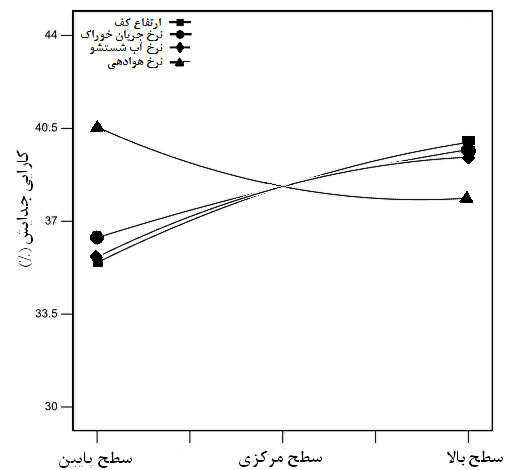
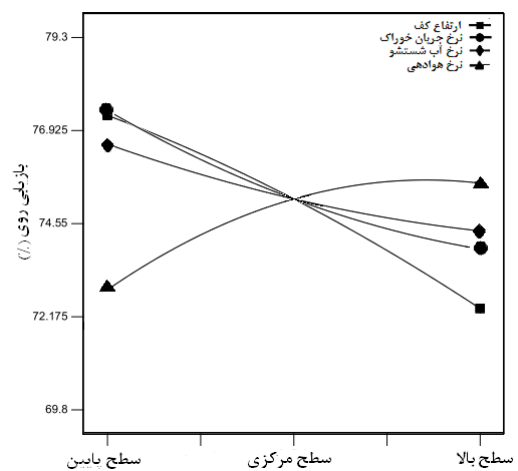
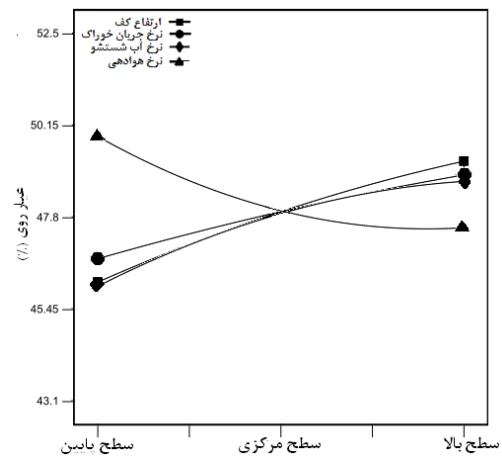
۲-۱ بررسی اثرات متغیرها

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین عیار روی در آزمایش ۲ و برابر با ۵۲/۵٪ بوده که در مقایسه با عملکرد کارخانه ۳/۷۵٪ افزایش نشان می‌دهد. بالاترین بازیابی در آزمایش ۱۰ و برابر با ۷۹/۲۶٪ و بهترین کارایی جدایش نیز در آزمایش ۲ و برابر با ۴۳/۴۲٪ به دست آمده است. در شکل ۱ با در نظر گرفتن ماندگی گاز به عنوان پاسخ، تأثیر پارامترهای عملیاتی ستون بر ماندگی گاز برای توجیه نحوه عملکرد متالورژیکی ستون ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش کلیه متغیرهای مورد بررسی در محدوده مطالعه سبب افزایش ماندگی گاز می‌شود. در شکل ۲، اثر پارامترهای عملیاتی بر پاسخ‌ها نشان داده شده است.

در شکل ۳ اثر دبی بار ورودی، دبی آب شستشو، دبی هوادهی و ارتفاع کف بر عیار، بازیابی و کارایی جدايش نشان داده شده است. همان طور که در شکل های ۱ و ۲ مشاهده می شود، افزایش ارتفاع کف و دبی آب شستشو به دلیل افزایش نرخ بایاس منجر به کاهش ماندگی گاز در ناحیه جمع آوری شده در نتیجه بازیابی کاهش یافته، و به دلیل افزایش بازگشت ذرات آبدوست از کف به ناحیه جمع آوری، عیار و کارایی جدايش افزایش یافته اند.

با افزایش دبی بار ورودی به منظور ثابت نگه داشتن ارتفاع کف، دبی باطله افزایش یافته، در نتیجه سبب افزایش نرخ بایاس شده و ماندگی گاز افزایش می یابد که این امر سبب کاهش زمان ماند در ناحیه جمع آوری و در نتیجه کاهش بازیابی (یا ظرفیت) می شود [۲۱]، [۱۹]. بنابراین با افزایش دبی بار ورودی، بازیابی روی کاهش و عیار و کارایی جدايش افزایش یافته است. همان طور که در شکل ۲ و جدول ۵ مشاهده می شود، تغییر دبی هوادهی اثر محسوسی بر ماندگی گاز ندارد. از طرفی افزایش دبی گازدهی به دلیل افزایش صعود ذرات در ناحیه پشت سر حباب، سبب افزایش بازیابی و کاهش عیار می شود [۲]. بنابراین همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود با افزایش نرخ هوادهی، بازیابی افزایش، عیار و کارایی جدايش روی کاهش یافته است.

برای تمامی پاسخها، مقادیر F و P مربوط به هریک از فاکتورهای اصلی، در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به این مقادیر مشخص شده است که دبی آب شستشو و ارتفاع کف مؤثرترین فاکتورها (P کمتر و مقدار F بالا) بر میزان عیار و کارایی جدايش روی هستند. همچنین برای بازیابی روی، ارتفاع کف و دبی بار ورودی تأثیرگذارترین فاکتورها بوده اند. در این بین تغییر دبی آب شستشو و دبی بار ورودی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر ماندگی گاز در ستون دارند



شکل ۲: اثر متغیرهای عملیاتی بر پاسخها.

جدول ۵: مقادیر F و P برای متغیرهای اصلی پاسخ‌ها

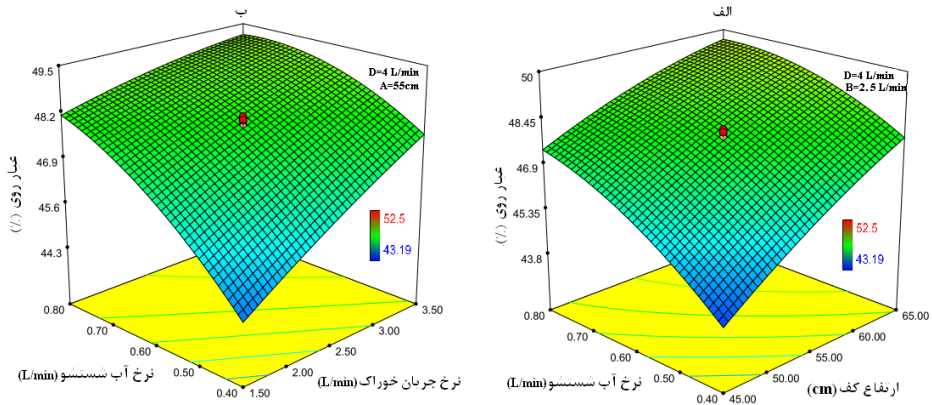
فکتور	عیار روی		بازیابی روی		کارایی جدایش		ماندگی گاز	
	مقدار F	مقدار P	مقدار F	مقدار P	مقدار F	مقدار P	مقدار F	مقدار P
ارتفاع کف	۱۰۲/۳۴	<۰/۰۰۰۱	۱۳۲/۰۲	<۰/۰۰۰۱	۲۶۷/۸۳	<۰/۰۰۰۱	۲۱/۸۹	۰/۰۰۰۳
دبی بار ورودی	۴۹/۰۷	۰/۰۰۰۴	۶۷/۸۵	۰/۰۰۰۲	۱۴۴/۵۲	<۰/۰۰۰۱	۱۰/۱۵	۰/۰۰۵۷
دبی آب شستشو	۱۷۶/۴۳	<۰/۰۰۰۱	۶۱/۱۰	۰/۰۰۰۲	۴۲۵/۸۹	<۰/۰۰۰۱	۴۸/۶۲	<۰/۰۰۰۱
دبی هوادهی	۴۶/۳۶	۰/۰۰۰۵	۳۱/۹۸	۰/۰۰۱۳	۷۴/۷۴	۰/۰۰۰۱	۱۳/۴۲	۰/۰۰۲۱

افزایش اختلاط در کف سبب اندکی افزایش در بازیابی روی شده است. همان‌طور که در شکل ۴ ب مشاهده می‌شود، تأثیر ارتفاع کف بر بازیابی روی بیشتر از دبی خواک‌دهی است و افزایش ارتفاع کف در مقدار بیشینه دبی بار ورودی به دلیل افزایش نرخ آب بایاس و در نتیجه کاهش زمان ماند متوسط ذرات سبب کاهش بازیابی شده است. دلیل کاهش شدید بازیابی با افزایش دبی بار ورودی در مقادیر بیشینه دبی آب شستشو نیز همین پدیده است.

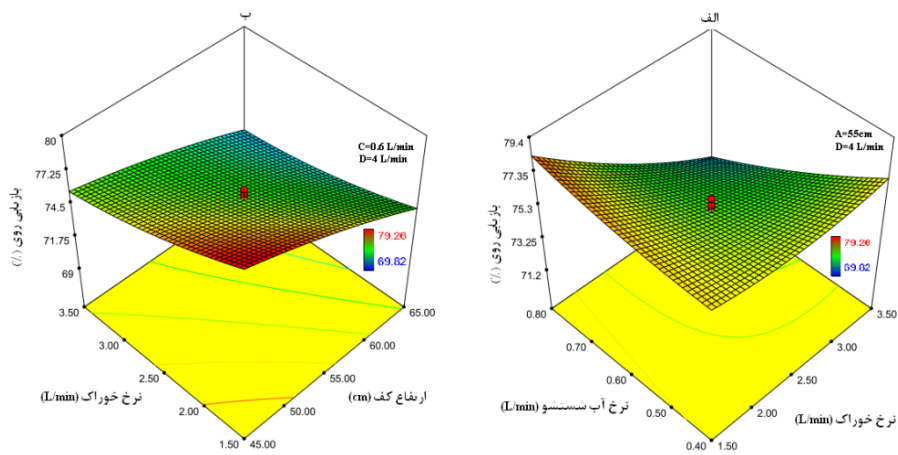
به ازای مقدار بیشینه دبی آب شستشو، افزایش ارتفاع کف سبب افزایش کارایی جدایش شده است (شکل ۵ الف). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مقدار بیشینه دبی بار ورودی، با افزایش ارتفاع کف، کارایی جدایش به شدت افزایش می‌یابد (شکل ۵ ب). بنابراین ترکیب دبی بار ورودی و ارتفاع کف بیشینه می‌تواند سبب افزایش کارایی جدایش شود. همچنین افزایش دبی آب شستشو به ازای کلیه مقادیر دبی هوادهی به دلیل افزایش دبی بازگشت ذرات آبدوست به ناحیه جمع‌آوری و نیز افزایش ماندگی گاز سبب کاهش بازیابی و افزایش عیار می‌شود. این پدیده‌ها به خوبی در نمودار کننتوری عیار بازیابی بر حسب دبی هوادهی و آب شستشو قابل مشاهده است (شکل ۶). همچنین بیشترین عیار و کمترین بازیابی روی در شرایط دبی آب شستشو بیشینه و دبی هوادهی کمینه به دست آمده است.

همان‌طور که در مدل‌های ارائه شده مشاهده شد، بر هم‌کنش بین متغیرها اثر قابل توجهی بر پاسخ‌ها دارد. به همین دلیل اثرات متقابل پارامترها مورد بحث قرار می‌گیرد. در شکل ۳ الف اثر متقابل دبی آب شستشو و ارتفاع کف به ازای مقادیر متوسط دبی بار ورودی و هوادهی بر عیار روی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار هر دو متغیر عیار روی در کنسانتره افزایش می‌یابد اما بطور نسبی تأثیر ارتفاع کف بیشتر است. با توجه به جدول ۵، دبی بار ورودی بعد از ارتفاع کف، مؤثرترین فکتور بر عیار روی می‌باشد. بررسی اثر دبی بار ورودی و آب شستشو بر عیار در شکل ۳ ب نشان داده شده است. در مقادیر متوسط نرخ هوادهی و ارتفاع کف با افزایش دبی آب شستشو و بار ورودی، عیار روی افزایش می‌یابد و به ازای مقادیر بیشینه دبی بار ورودی و آب شستشو، عیار روی برابر با ۴۹/۶۴٪ به دست آمده است.

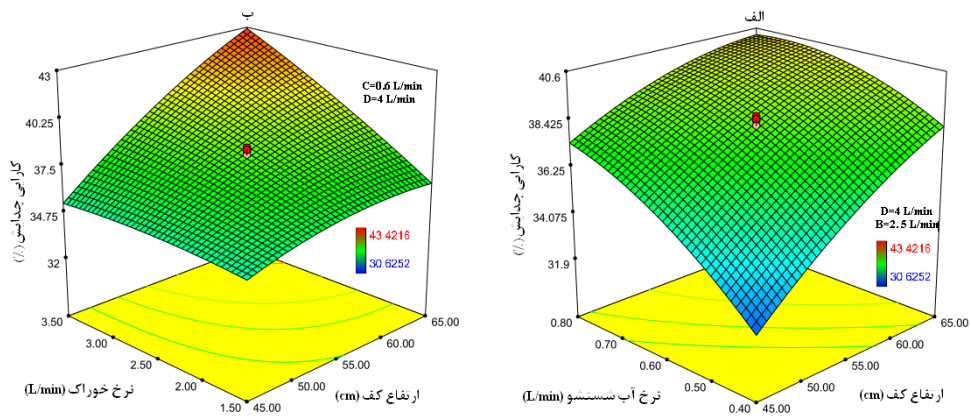
باید توجه داشت اگر در یک شرایط عملیاتی معین دبی آب شستشو بالا باشد، افزایش مجدد آن ممکن است باعث ایجاد اختلاط بیش از حد در کف و افزایش دبی انتقال کف به کنسانتره شود و در نتیجه بازیابی افزایش یابد [۲]. بنابراین همان‌طور که در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود، افزایش دبی آب شستشو به ازای مقادیر کمینه دبی بار ورودی به دلیل



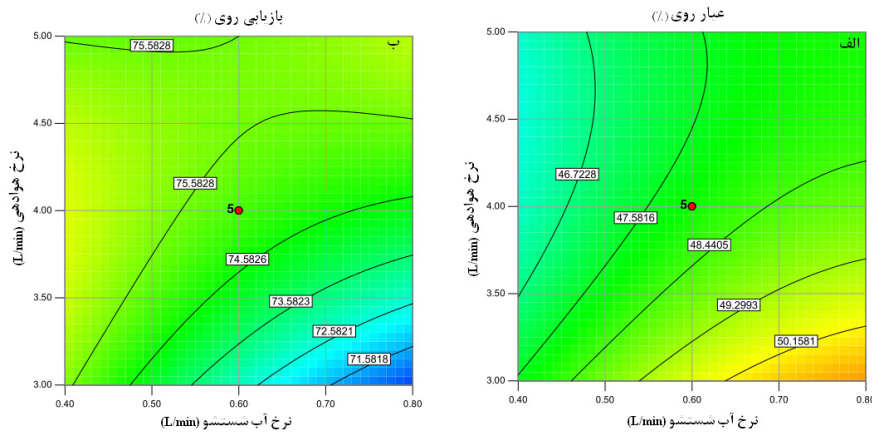
شکل ۳: بررسی اثر متقابل فاکتورها بر عیار روی.



شکل ۴: بررسی اثر متقابل فاکتورها بر پایه روی.



شکل ۵: بررسی اثر متقابل فاکتورها بر کارایی جدایش روی.



شکل ۶: نمودار کنتوری اثر متقابل دبی آب شستشو و دبی هوادهی بر عيار و بازيابی روی (در مقادير متوسط دبی بار ورودی و ارتفاع کف).

۲-۲- بهينه‌سازی

کردن همزمان هر سه پاسخ بررسی شده است. نتایج حاصل از بهينه‌سازی پاسخ‌ها در جدول ۶ نشان داده شده‌است. حداکثر کارایی جدایش روی در حالت اول مشاهده می‌شود. از اینرو شرایط عملیاتی حالت اول به عنوان شرایط بهينه انتخاب شد و اعتبارسنجی شرایط بهينه پیشنهادی با انجام یک آزمایش (آزمایش تأیید) در شرایط بهينه انجام شد. نتایج آزمایش تأیید در جدول ۷ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شرایط بهينه کنسانتره روی با عيار ۵۲/۳۷٪ و کارایی جدایش ۴۳/۹۴٪ به دست آمده‌است. همچنین بازيابی روی برابر با ۷۳/۱۲٪ بوده‌است که در مقایسه با عملکرد کارخانه ۲/۲۲٪ افزایش یافته است. با مقایسه نتایج جدول ۷ و جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی ستون فلوتاسیون با سلول‌های مکانیکی مرحله شستشو است، بهينه‌سازی در جهت بیشینه کردن کارایی جدایش، کارایی جدایش و عيار روی و یا بیشینه

با توجه به اینکه در روش‌های سطح- پاسخ، یافتن شرایط بهينه برای پاسخ‌ها در فضای طراحی انجام می‌شود، بنابراین بهينه‌سازی با توجه به اهداف می‌تواند در جهت کمینه یا بیشینه کردن یک یا چند پاسخ باشد [۲۲]. برای مدل‌ها، نقاط بیشینه و کمینه از طریق مشتق اول معادلات مدل و از میان نقاط بحرانی بدست می‌آیند. در این تحقیق، روش بهينه‌سازی پیوسته جهت بهينه‌سازی سه پاسخ موجود (عيار، بازيابی و کارایی جدایش روی) توسط نرم افزار طراحی آزمایش DX7 انجام شده است. از آنجایی که این مطالعه به منظور امکان‌سنجی جایگزینی ستون فلوتاسیون با سلول‌های مکانیکی مرحله شستشو است، بهينه‌سازی در جهت بیشینه کردن کارایی جدایش، کارایی جدایش و عيار روی و یا بیشینه

جدول ۶: شرایط بهينه پیشنهادی توسط نرم‌افزار DX7 برای انجام آزمایش‌ها

ردیف	پاسخ	هدف	ارتفاع کف (cm)	دبی بار ورودی (L/min)	دبی آب شستشو (L/min)	عيار روی (%)	بازيابی روی (%)	کارایی جدایش (%)
۱	کارایی جدایش	بیشینه	۶۵	۳/۴۵	۰/۶۵	۵۲/۴۰	۷۲/۹۸	۴۳/۹۵
۲	کارایی جدایش	بیشینه	۶۵	۳/۵	۰/۶۸	۵۲/۴۷	۷۱/۹۸	۴۳/۸۸
	عيار روی	بیشینه						
۲	کارایی جدایش	بیشینه	۶۵	۳/۴۹	۰/۴	۵۱/۰۳	۷۸/۲	۴۲/۸۳
	عيار روی	بیشینه						
	بازيابی روی	بیشینه						

داده‌های مورد نیاز برای طراحی ستون فلوتاسیون که با استفاده از آزمایش تأیید به دست آمده و نیز ویژگی‌های بار ورودی مرحله شستشو کارخانه، در جدول ۸ نشان داده شده‌است.

جدول ۸: داده‌های لازم برای بزرگ مقیاس کردن ستون

مقدار	علائم	مشخصات
۱۰	M_{fs}	دبی جامد بار ورودی (t/h)
۱۱	C_s	درصد جامد پالپ (%)
۳۷/۵	f	عیار روی در بار ورودی (%)
۳/۳۴	ρ_p	وزن مخصوص ذرات (gr/cm^3)
۷۵	d_{80}	اندازه ذره (μm)
۰/۰۶۸۸	J_B	دبی آب بایاس (cm/s)
۰/۷۸	J_g	دبی هوادهی (cm/s)
۱۹/۱۲	ε_g	ماندگی گاز (%)
۰/۱۷۸	k_{fc}	نرخ سینتیک سولفیدروی (min^{-1})
$73/12 \leq$	R	بازیابی روی (%)
$52/37 <$	c	عیار روی (%)

در طراحی اولیه ستون پس از بررسی موارد صنعتی موجود، ۴ ستون (N) با قطر ۱ متر (d_c) و ارتفاع ناحیه جمع‌آوری (H_c) ۹ متر در نظر گرفته شد [۱۶]. سپس با استفاده از داده‌های جدول ۸ و به کار بردن مراحل اول تا نهم روش فینچ و دابی برای بزرگ مقیاس کردن ستون، بازیابی ۷۳/۲۸٪ حاصل شد. در ادامه به منظور کاهش تعداد ستون‌ها و همچنین افزایش نسبت ارتفاع به قطر ستون و در نتیجه کاهش اختلاط در ستون و در نتیجه نزدیک شدن به شرایط جریان پیستونی در ستون، با استفاده از رابطه (۱) ستونی به قطر ۲ متر که توسط تیغه‌گذاری به چهار قسمت تقسیم شده و با ارتفاع ناحیه جمع‌آوری ۹ متر، پیشنهاد شد. با در نظر گرفتن ۲ متر برای ناحیه کف و ۱ متر برای فضای حباب‌ساز، ارتفاع کلی ستون ۱۲ متر به دست آمد.

۳- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، سه مدل درجه دو برای عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی توسط نرم‌افزار DX7 پیشنهاد شد. دبی آب شستشو و ارتفاع کف برای عیار روی و کارایی جدایش مؤثرترین فاکتورها بوده‌اند. در مورد بازیابی روی، دبی بار ورودی و ارتفاع کف مؤثرتر بوده‌اند. در کل، افزایش دبی آب شستشو، بار ورودی و ارتفاع کف سبب افزایش

جدول ۷: نتایج آزمایش تأیید

جریان‌ها			مشخصات
باطله	کنسانتره	بار ورودی	
۲۱/۱۵	۵۲/۳۷	۳۷/۵	عیار روی (%)
۷۳/۱۲			بازیابی روی (%)
۴۳/۹۴			کارایی جدایش (%)

۲-۳- طراحی سلول فلوتاسیون ستونی پیشنهادی

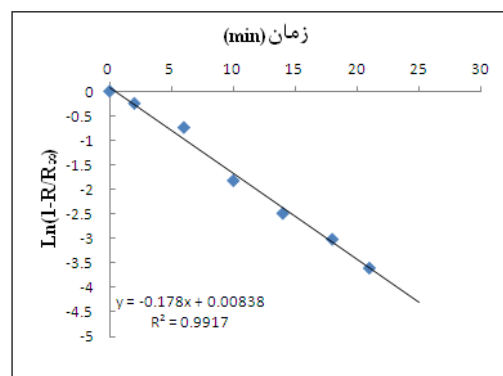
یکی از مهمترین داده‌های مورد نیاز برای بزرگ مقیاس کردن ستون فلوتاسیون نرخ سینتیک کلی در دو بخش جمع‌آوری و کف (k_{fc}) است. نظر به اینکه فرآیند فلوتاسیون هیچگاه دارای بازیابی ۱۰۰٪ نبوده و اغلب توسط مدل سینتیک مرتبه اول بیان می‌شود، از مدل سینتیک زیر می‌توان برای توصیف این فرآیند استفاده کرد [۱۷، ۱۸]:

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

که در آن R_{∞} بازیابی در زمان طولانی است. بنابراین k_{fc} برابر است با شیب نمودار $\ln(1-R/R_{\infty})$ بر حسب زمان [۱۵]:

$$\ln(1-R/R_{\infty}) = -k_{fc}t \quad (2)$$

برای تعیین k_{fc} یک آزمایش در شرایط بهینه انجام و در فواصل زمانی معین از سرریز و ته ریز ستون نمونه برداری شده و پس از تعیین عیار نمونه‌ها، بازیابی روی در هر مرحله محاسبه شد [۱۷، ۱۸]. سپس k_{fc} با رسم نمودار $\ln(1-R/R_{\infty})$ بر حسب زمان برابر با $0/178 \text{ min}^{-1}$ به دست آمد (شکل ۷).



شکل ۷: محاسبه ثابت سینتیک سولفید روی با سلول ستونی

[7] Barani, K., Koleini, S.M.J. and Pazoki, A.;2008; “*Study effects of parameters in upon the hydrodynamic of conditions of column flotation cell by Taguchi method*”, Iranian Mining Engineering Conf., Tehran, Iran.

[8] Groopo, J. G. and Perekh, B. K.;1990; “*Continuous Pilot Scale Testing of Column Flotation for Recovery of Fine Coal*”, Mining Eng., 1189.

[9] Mavros, P., Kydros, K. A. and Matis, K. A.;1993; “*Arsenopyrite Enrichment by Column Flotation*”, Miner. Eng., Vol.6, pp.1265-1277.

[10] Tao, D., Luttrell, G. H. and Yoon, R. H. ;2000; “*A Parametric Study of Froth Stability and Its Effect on Column Flotation of Fine Particles*”, Int. J. Miner. Process., No.59, pp.25-43.

[11] Barani, K., Koleini, S. M. J. and Behrozi, K.; 2005; “*A study of air flow rate effect on column flotation performance*”, Iranian Mining Engineering Conf., Tehran, Iran.

[12] Goodall, C. M. and O'Connor, C. T. ;1992; “*Residence Time Distribution Studies in a Flotation Column. Part 2: The Relationship Between Solids Residence Time Distribution and Metallurgical Performance*”, Int. J. Miner. Process, Vol.36, pp.219-228.

[13] Koleini, S. M. J. and Barani, K.;2004; “*A study of wash water rate effect on column flotation performance*”, The National Steel Symposium04, Yazd, Iran.

[14] Alford, R.A.;1992; “*Modelling of single flotation column stages and column circuit*”, International Journal of Mineral Processing, Vol. 36, pp.155-174.

[15] Idlas, S. and et al.;1990; “*Conceptual Design of Packed Flotation Columns*”, Znd Eng.Chem. Res., Vol.29, pp.943-949.

[16] Darabi, H.; 2012; *Investigating the possibility of replacement Zinc sulfide cleaner cells by column flotation in Bama plant*, MSc. Thesis, University of Kashan.

[17] Rezaie, B.;1999; *Flotation*, Hormozgan Publication.

[18] Nematollahi, H.; 1996; *Mineral Processing*, Tehran University.

[19] Gomez, C.O.; Uribe-Salas, A.; Finch, J.A.; Huls, B.J.; 1995; “*Axial gas holdup profiles in the collection zone of flotation columns*”, Miner. Metall. Process. 12 (1), pp. 16-23.

[20] Pe´rez-Garibay, R. and Del Villar, R.; 1999; “*On-line gas holdup measurement in flotation columns*”, Can. Metall. Quart. 38 (2), pp. 141-148.

کارایی جدایش و افزایش دبی هوادهی سبب کاهش کارایی جدایش روی شده است. بهینه‌سازی فرآیند فلوتاسیون ستونی با هدف بیشینه کردن کارایی جدایش انجام شد (جدول ۶). نتایج آزمایش فلوتاسیون در شرایط بهینه نشان داد که استفاده از سلول ستونی می‌تواند سبب ۳/۶۲٪ افزایش عیار و ۲/۲۲٪ افزایش در بازیابی روی شده و کارایی جدایش نیز به مقدار ۴/۷۵٪ افزایش یابد. سپس با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش انجام شده در شرایط بهینه، ستونی به قطر ۲ متر که توسط تیغه‌گذاری به چهار بخش تقسیم شده، با ارتفاع ۱۲ متر برای مرحله شستشوی کارخانه باما طراحی و پیشنهاد شد.

۴- تقدیر و تشکر

بدینوسیله، محققین بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه کاشان به دلیل در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی و مجتمع صنعتی ایرانکوه به دلیل حمایت هایشان در تهیه نمونه و آنالیز نمونه‌ها تشکر و قدردانی کنند.

۵- منابع

[1] Jameson, G.J.;1988; “*New concept in flotation column design*”, Mineral and Metallurgical processing (Feb), pp.44-47.

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

[3] 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, No 38, pp.287-293.

[4] Koleini, S. M. J. and Gholizadeh, S.; 2007 ; “*The feasibility study of replacement of conventional cells by column cells in lead cleaner stage in Mansourabad plant*”, The 25th Symposium on Geosciences, Tehran, Iran.

[5] Koleini, S.M.J, Khodadadi, A. and Gholizadeh, S.;2008; “*Investigation of column cell replacement in zinc sulfide rougher stage in Mansorabad lead and zinc processing plant*”, Iranian Mining Engineering Conf., Tehran, Iran.

[6] Koleini, S. M. J. and Porhajati, B.;2008; “*Zinc sulphide concentrate cleaning by column flotation cell*”, The 26th Symposium on Geosciences, Tehran, Iran, 2008.

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

[21] Barani, K., Khodadadi, A. and Koleini, S.M.J.;2004; “*A study of under flow rate effect on column flotation performance*”, The 22nd Symposium on Geosciences, Tehran, Iran.