

## تأثیر متغیرهای عملیاتی فلوتاسیون ستونی در سولفورزدایی از کنسانتره‌های آهن

فردیس نخعی<sup>۱</sup>، مهدی ایران‌نژاد<sup>۲\*</sup>، سیما محمدنژاد<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

(دریافت: بهمن ۱۳۹۶، پذیرش: آبان ۱۳۹۸)

### چکیده

ذرات ریز پیریت در حضور کانی‌های آهن‌دار مانند مگنتیت و هماتیت، به طور کامل توسط جداکننده‌های مغناطیسی بازیابی نمی‌شوند و فلوتاسیون معکوس روشی موثر برای کاهش سولفور از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی است. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر متغیرهای عملیاتی بر عملکرد ستون فلوتاسیون در فرآیند سولفورزدایی از کنسانتره آهن و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، برای دستیابی به بیشینه بازیابی سولفور همراه با کمینه اتلاف آهن است. بدین منظور با انجام ۴۵ آزمایش در قالب طراحی آزمایش‌های CCD، تأثیر عوامل عملیاتی مهم نظیر سرعت ظاهری گاز، ارتفاع کف، میزان کلکتور و کف‌ساز، درصد جامد و pH پالپ برای دستیابی به هدف، مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از تأثیر عوامل معنادار و تحلیل واریانس آنها، شرایط عملیاتی بهینه برای دستیابی به مقادیر بیشینه کارایی پیش‌بینی شد. با اعمال شرایط بهینه عملیاتی (۱۵۰ gr/t کلکتور PAX، ۲۰۰ gr/t کف‌ساز MIBC، pH = ۴/۹، ۱/۶ cm/s هوای ورودی، ۳۰ = درصد جامد، ۲۰ cm ارتفاع کف)، میزان عیار سولفور کنسانتره و بازیابی آهن در سطح اعتماد ۹۵ درصد به ترتیب برابر ۰/۰۸ و ۹۸ درصد به دست آمد.

### کلمات کلیدی

فلوتاسیون ستونی، کنسانتره آهن، سولفورزدایی، بهینه‌سازی، طراحی آزمایش، عملکرد فرآیند، متغیرهای عملیاتی

\*عهده‌دار مکاتبات: iranajad@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

می‌شود. این ناحیه معادل ناحیه بازیابی یا پالپ در سلول‌های فلوتاسیون معمولی است. ذرات جمع شده به لایه کف منتقل می‌شوند. وظیفه آب شستشو، برگشت دادن ذرات آب دوست است که به صورت دنباله‌روی به ناحیه کف وارد شده‌اند. بدین ترتیب آب شستشو سبب افزایش عیار کنسانتره می‌شود [۲].

با کاهش ذخایر عیار بالای کانه‌های آهن در جهان و رشد سریع تقاضا در بازارهای جهانی به محصولی با کم‌ترین میزان ناخالصی، فرآوری کانه‌های کم‌عیار آهن به موضوع قابل توجهی تبدیل شده است. جدایش ثقلی و مغناطیسی رایج‌ترین روش‌های فرآوری ذخایر اقتصادی آهن هستند. از نظر عملیاتی، کنسانتره آهن به دست آمده از جدایش ثقلی و مغناطیسی حتی بعد از چند مرحله جداسازی، به دلیل قفل‌شدگی کانی‌های باطله یا دنباله‌روی ذرات ریزدانه اغلب دارای مقادیری ناخالصی است [۳-۵]. نیاز بازار و صنایع تولید آهن و فولاد به کنسانتره‌های با عیار آهن بالا (بیشتر از ۶۰ درصد) و ناخالصی‌های کمینه (دو درصد سیلیس، ۰/۰۱ درصد فسفر، دو درصد آلومینا)، اهمیت استفاده از فرآیند فلوتاسیون را افزایش داده است [۶، ۷].

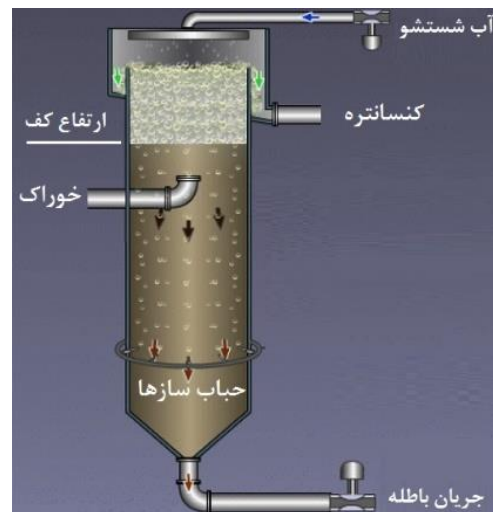
فرآیند فلوتاسیون در حدود سال ۱۹۶۰، به عنوان روشی کارآمد در حذف ناخالصی‌ها به صنعت آهن معرفی شده است. فلوتاسیون کانه‌های آهن به دو روش مستقیم و معکوس انجام می‌شود. در فلوتاسیون مستقیم، اکسیدهای آهن توسط کلکتورهای آنیونی مانند اسیدهای چرب شناور می‌شود. در فلوتاسیون معکوس کانی‌های باطله با استفاده از مواد شیمیایی نظیر آمین یا گزنتات شناور شده و کانی با ارزش بازشد می‌شود [۸]. انتخاب روش پرعیارسازی بر پایه ترکیبات کانی‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی، درجه آزادی کانی‌های با ارزش و گانگ همراه است. در حال حاضر روش فلوتاسیون معکوس، رایج‌ترین روش مورد استفاده در صنعت کانه آهن است [۷، ۸].

در صنعت فرآوری کانه‌های آهن، به طور عمده از سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی استفاده می‌شود. محدودیت‌های سلول‌های مکانیکی در زمان مواجهه با ذرات ریز که دارای احتمال برخورد پایین با حباب‌های هوا هستند و یا در معرض دنباله‌روی قرار دارند، بسیار برجسته می‌شود [۹].

کاهش شدید منابع پرعیار و متعاقب آن توسعه ذخایر مواد معدنی جدید، اصلاح مدارهای فلوتاسیون قدیم را

فلوتاسیون یکی از روش‌های مؤثر در بازیابی کانی‌های با ارزش در ابعاد دانه‌ریز است که بر مبنای خواص شیمی فیزیکی سطوح ذرات جامد در یک محیط سیال شامل حباب‌های هوا، بنا شده است. با توجه به نوع ماشین فلوتاسیون و سیستم‌های حباب‌ساز، عوامل کنترلی و فرآیندی متعددی در افزایش کارایی عملیات نقش دارند. این عوامل مانند دور همزن، ارتفاع کف، میزان هوا و ... با استفاده از روش‌های مختلف قابل اندازه‌گیری و کنترل هستند. میزان بهینه این عوامل در کارکرد مؤثر فلوتاسیون نقش بسزایی دارند.

سلول‌های فلوتاسیون ستونی به دلیل هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی پایین‌تر، کاهش تعداد مراحل پرعیارسازی، فضای مورد نیاز کم‌تر، کنترل خودکار و تولید کنسانتره با عیار و بازیابی بالاتر در مقایسه با سلول‌های مکانیکی، به طور وسیعی در صنایع فرآوری مورد استقبال قرار گرفته‌اند [۱]. امروزه بیشترین کاربرد فلوتاسیون ستونی در صنایع فلزات پایه از جمله: مس، سرب و روی، زغال و یا مس-مولیبدن است. بخش‌های مختلف سلول ستونی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: ستون فلوتاسیون

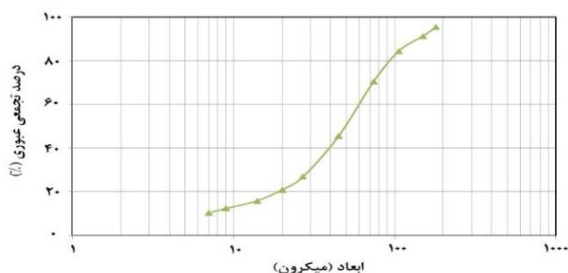
در این نوع سلول، خوراک در فاصله یک سوم از بالای ستون وارد می‌شود و هنگام پایین رفتن در مقابل انبوه حباب‌های تولید شده توسط حباب‌ساز قرار می‌گیرد. حباب‌ها، ذرات آب‌ران را جمع‌آوری می‌کنند، به همین دلیل به این منطقه از ستون، ناحیه جمع‌آوری گفته

در مطالعه حاضر برای انجام آزمایش‌ها، از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی خط فرآوری باطله‌های خشک<sup>۱</sup> مجتمع سنگ آهن گل‌گهر (DTP) به مدت ۴ ماه نمونه‌برداری شد.

در این خط فرآوری، باطله‌های بخش خشک کارخانه مگنتیت (با ذخیره احتمالی ۲۵ میلیون تن که از زمان شروع تولید در محل مشخصی انباشته شده‌اند)، مورد فرآوری قرار گرفته و هماتیت و مگنتیت آن استحصال می‌شود. در مدار مذکور، مواد معدنی در اولین مرحله وارد سرند دو طبقه می‌شوند. ذرات درشت‌تر از ۸ میلی‌متر از مدار خارج شده و ذرات با ابعاد ۸-۱/۵ میلی‌متر در یک مدار بسته توسط آسیای میله‌ای مورد خردایش قرار می‌گیرند. ته‌ریز سرند وارد بخش ماریچ رافر می‌شود و کنسانتره آن به ماریچ‌های کلینر اولیه و ثانویه انتقال می‌یابد. کنسانتره مرحله کلینر ثانویه وارد سرند با دهانه ۳۰۰ میکرون می‌شود. ذرات بزرگ‌تر برای خردایش مجدد به آسیای گلوله‌ای ارسال می‌گردد. خروجی آسیا با ته‌ریز سرند مخلوط شده و به سیکلونی که در مدار بسته با آسیای گلوله‌ای قرار دارد، منتقل می‌شود. سرریز سیکلون با دانه‌بندی ریزتر از ۱۰۰ میکرون، به بخش جداکننده‌های مغناطیسی شدت پایین و شدت بالا ارسال می‌شود.

کنسانتره‌های حاصل از جدایش مغناطیسی در این واحد فرآوری، حاوی ۰/۴ تا ۰/۶ درصد سولفور است که بیشتر از حد مجاز برای تولید فولاد (۰/۱ درصد) است. بنابراین از فلوتاسیون معکوس برای کاهش سولفور کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی استفاده می‌شود.

نتایج آنالیز دانه‌بندی نمونه معرف (کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی) نشان داد که به طور متوسط در حدود ۸۰ درصد وزنی از ذرات خوراک ورودی سهم ذرات زیر ۹۰ میکرون است. توزیع دانه‌بندی نمونه معرف در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: توزیع دانه بندی نمونه مورد مطالعه

ضروری گردانیده است. زیرا خردایش بیشتر و زمان ماند فلوتاسیون طولانی‌تر برای ذخایر معدنی جدید مورد نیاز است. برخی از تولیدکنندگان آهن جهان از ستون‌های فلوتاسیون به عنوان جایگزین مناسب ماشین‌های فلوتاسیون مکانیکی مرسوم برای کاهش سیلیس، فسفر و آلومینا در خوراک کارخانه گندله‌سازی استفاده کرده‌اند [۹، ۱۰].

سولفور باعث شکنندگی و تردی فولاد در حرارت‌های بالا، کاهش خاصیت جوش خوردگی، افزایش خوردگی، آلودگی هوا در حین پخت گندله، افزایش مصرف سنگ آهک و افزایش تولید سرباره در بخش فولادسازی می‌شود. پیریت و پیروتیت کانی‌های پارامگنتیت هستند و هنگامی که در میدان مغناطیسی در مجاورت کانی‌های آهن‌دار مانند مگنتیت و هماتیت قرار می‌گیرند، دارای خاصیت مغناطیسی می‌شوند و به طور کامل توسط جداکننده‌های مغناطیسی بازیابی نمی‌شوند. فلوتاسیون معکوس روشی موثر برای کاهش سولفور از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی است [۱۱-۱۳]. اکثر پژوهش‌های صورت گرفته در مورد به کارگیری ستون‌های فلوتاسیون در فرآوری کانه‌های آهن، برای حذف سیلیس بوده است و تاکنون بررسی سیستماتیک این روش برای پرعیارسازی ذرات ریزدانه آهن به منظور کاهش محتوی سولفور انجام نشده است.

در این پژوهش، کاهش میزان سولفور ناشی از پیریت کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی خط بازیابی هماتیت مجتمع سنگ آهن گل‌گهر با عیار سولفور حدود ۰/۵ درصد با استفاده از فلوتاسیون ستونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به عوامل متعدد موثر بر فلوتاسیون ستونی، بهینه‌سازی فرآیند برای دستیابی به محصول هدف با مشخصات مورد نظر نیازمند انجام طراحی آزمایش‌های دقیق و تحلیل آماری نتایج است. در این پژوهش از روش طراحی آزمایش CCD برای اجرای آزمایش‌ها استفاده شد. متغیرهای عملیاتی شامل نرخ هوادهی، درصد جامد، ارتفاع کف، pH و میزان مواد شیمیایی انتخاب شدند که تأثیر زیادی بر فلوتاسیون پیریت دارند.

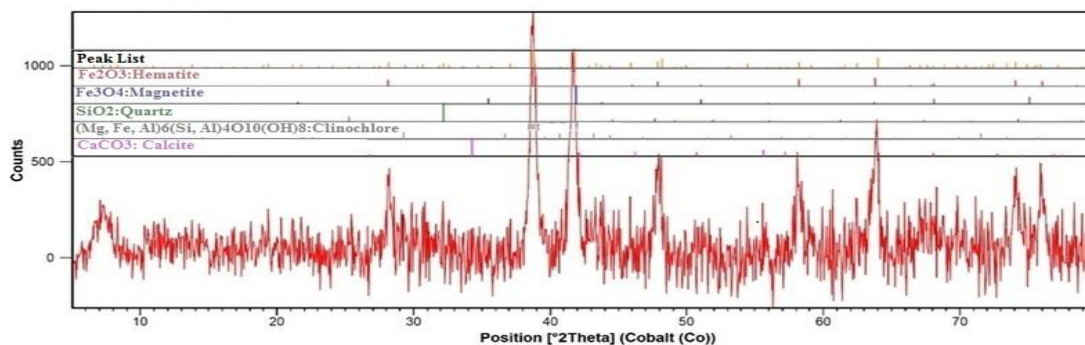
## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱- ویژگی‌های نمونه

به منظور شناسایی کانی‌های موجود بر روی نمونه‌های معرف، تحلیل پراش پرتو ایکس انجام شد (شکل ۳). نتایج تحلیل‌ها نشان داد که در نمونه معرف کانی‌های هماتیت و مگنتیت فاز اصلی را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این کانی‌های کلسیت، کوارتز، پیریت دیکیت و کلریت نیز شناسایی شدند.

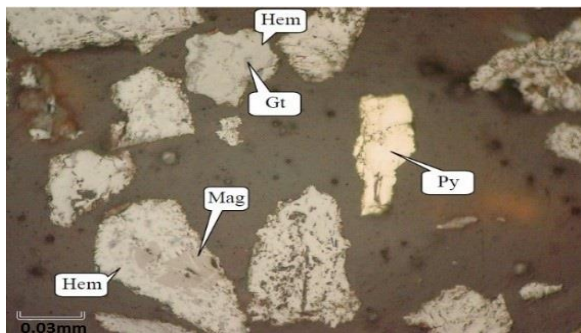
میانگین عیاری عناصر توسط آنالیز شیمیایی نمونه معرف در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۱: مشخصات عیاری خوراک نمونه‌برداری شده (به روش شیمی تر) برای انجام آزمایش‌ها

P (%)	S (%)	FeO (%)	Fe (%)
۰/۱۳	۰/۴۸	۱/۴۸	۶۳/۳۳



شکل ۳: آنالیز پراش پرتو ایکس نمونه معرف

انعکاسی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعات درجه آزادی پیریت در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۴: آزادی پیریت، اکسیداسیون بلور مگنتیت به هماتیت و اکسیداسیون هماتیت به گوتیت (+۴۵ و -۷۵ میکرون)

جدول ۲: درجه آزادی پیریت در نمونه مورد مطالعه

اندازه (میکرون)	درصد پیریت آزاد
(+۱۸۰)	۶۵
(-۱۸۰ و +۱۵۰)	۷۵
(-۱۵۰ و +۱۰۶)	۸۵
(-۱۰۶ و +۷۵)	۹۳
(-۷۵)	۹۷

## ۲-۲- روند انجام آزمایش‌ها

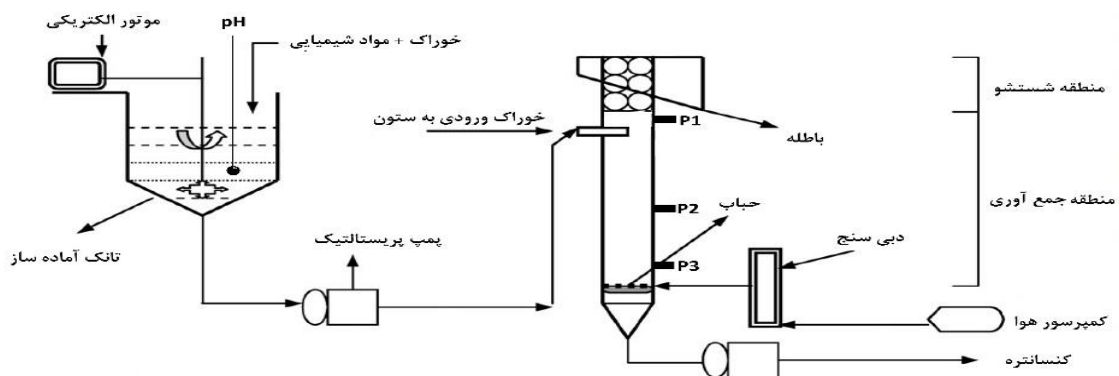
با توجه به طیف محدود شرایط عملیاتی و در دسترس نبودن شرایط عملیاتی خاص در مقیاس صنعتی، این مطالعه موردی در مقیاس نیمه‌صنعتی پایه‌گذاری شد. برای

مطالعات کانی‌شناسی مقاطع صیقلی و تیغه‌های نازک نمونه معرف نشان داد که هماتیت مهم‌ترین کانی آهن‌دار است. هماتیت در نمونه ثانویه بوده و در اثر اکسیداسیون مگنتیت و طی فرآیند مارتیتی شدن ایجاد شده و حدود ۵۵ تا ۶۰ درصد نمونه را تشکیل می‌دهد. شدت مارتیتی شدن بسیار بالا بوده و در مواردی بلورهای مگنتیت کاملاً به هماتیت تبدیل شده و اثری از مگنتیت باقی نمانده و یا به صورت باقیمانده‌هایی در مرکز بلور دیده می‌شوند. همچنین فراوانی بسیار کم بلورهای مگنتیتی که در آن مارتیتی شدن ضعیفی رخ داده، مشاهده می‌شود. در مواردی شدت اکسیداسیون به حدی بالا بوده که هماتیت نیز در اثر اکسیداسیون به گوتیت تبدیل شده است. در نمونه معرف معمولاً هماتیت و مگنتیت با یکدیگر درگیری دارند. مقدار تقریبی مگنتیت در نمونه تقریباً ۸ تا ۱۰ درصد است. همچنین گوتیت در اثر اکسیداسیون پیریت حاصل شده است و دارای فراوانی در حدود ۶ درصد است. پیریت دارای فراوانی ۲ درصد است و درگیری کمی با کانی‌های حاوی آهن را در نمونه نشان می‌دهد (شکل ۴).

برای انجام مطالعات درجه آزادی، از نمونه‌های طبقه‌بندی شده، مقاطع صیقلی در ابعاد +۱۸۰، +۱۵۰، -۱۸۰، -۱۵۰، +۱۰۶، +۷۵، -۱۰۶ و -۷۵ بر حسب میکرون تهیه شد و توسط میکروسکوپ نوری پلاریزان با نور

و MIBC به عنوان کف‌ساز استفاده گردید. پس از تنظیم pH و آماده‌سازی خوراک با مواد شیمیایی (سه دقیقه کلکتور و دو دقیقه کف‌ساز)، پالپ به ستون خوراک‌دهی شد. قبل از انجام نمونه‌گیری از کنسانتره و باطله، برای تضمین عملیات ستون فلوتاسیون در شرایط پایا، سطح مشترک پالپ-کف برای دوره‌ای (دو برابر زمان ماند ستون) ثابت نگه داشته شد.

در این ستون برای اندازه‌گیری ماندگی گاز و ارتفاع کف از سه فشارسنج استفاده شده است، به طوری که دو حسگر در ناحیه پالپ (ناحیه جمع‌آوری) و یک حسگر در ناحیه کف (ناحیه شستشو) قرار دارد. داده‌های به دست آمده از حسگرها جهت انجام کالیبراسیون و پایش به یک پردازشگر مخابره و داده‌های واقعی به یک کنترل کننده ارسال می‌شوند. سیستم کنترل سطح پالپ سلول ستونی، دور موتور پمپ باطله را بر اساس موقعیت سطح مشترک نسبت به مقدار مطلوب، تغییر می‌دهد. لازم به ذکر است در انجام آزمایش‌ها از آب شستشو استفاده نگردید. مدار شماتیک فلوتاسیون ستونی به همراه تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵: مدار ستون فلوتاسیون مورد استفاده



شکل ۶: تجهیزات ستون فلوتاسیون مورد استفاده

انجام آزمایش‌ها از سلول فلوتاسیون ستونی دانشگاه صنعتی امیرکبیر به منظور سولفورزدایی از کانه‌های آهن در مقیاس نیمه‌صنعتی استفاده شد. این ستون از جنس پلاکسی گلاس با ارتفاع ۴۰۰ و قطر ۱۰ سانتی‌متر بود. جهت تامین بار اولیه از یک مخزن مجهز به یک همزن استفاده شد، تا ضمن آماده‌سازی از ته‌نشینی مواد جلوگیری نماید. خوراک آماده‌سازی شده توسط پمپ پرستالتیک به مخزن نوسان‌گیر ستون فلوتاسیون (جهت کم کردن نوسانات نرخ خوراک در ستون فلوتاسیون) ارسال و سپس به صورت ثقلی به ستون وارد شد. برای اندازه‌گیری و تنظیم نرخ جریان هوا از فلومتر استفاده شد. حباب‌ساز مورد استفاده از نوع داخلی و متخلخل (قطر منافذ ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون) با قطر سه و طول ۱۴ سانتی‌متر بود.

مقدار pH پالپ در طول آزمایش‌ها در مخزن خوراک ورودی به طور پیوسته اندازه‌گیری و با افزودن اسید سولفوریک و NaOH در مقدار مورد نظر تنظیم شد. از آنجایی که هدف از عملیات فلوتاسیون ستونی، کاهش پیریت در محصول نهایی است لذا از عملیات فلوتاسیون معکوس با آمیل گزنات پتاسیم (PAX) به عنوان کلکتور

## ۳-۲- طراحی آزمایش‌ها

از آنجایی که هدف این پژوهش تعیین تأثیر متغیرهای عملیاتی با عملکرد فلوتاسیون ستونی در سولفورزدایی از کنسانتره‌های آهن است، لذا اولین قدم، انجام آزمایش‌ها در طیف وسیعی از متغیرهای عملیاتی است. بدین ترتیب نتایج مدل‌های ارائه شده با در نظر گرفتن محدوده‌های وسیعی از داده‌ها، از اعتبار بالایی برخوردار خواهد بود.

در این مطالعه از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ CCD به صورت بخشی (۱/۲) استفاده شد. مهم‌ترین متغیرهای عملیاتی شامل نرخ هوادهی، درصد جامد، ارتفاع کف، میزان مواد شیمیایی و pH در پنج سطح مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مجموع ۴۵ آزمایش فلوتاسیون ستونی در مقیاس نیمه‌صنعتی با استفاده از نرم‌افزار DX7 طراحی و انجام شد. عوامل و سطوح به کار رفته در آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مقادیر سطوح انتخاب شده برای آزمایش‌های

## فلوتاسیون ستونی

عامل	شاخص	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
میزان کلکتور (gr/t)	A	۴۰	۷۰	۱۳۰	۱۹۰	۲۲۰
میزان کف‌ساز (gr/t)	B	۶۳	۹۰	۱۴۵	۲۰۰	۲۲۸
ارتفاع کف (cm)	C	۱۰	۱۵	۲۵	۳۵	۴۰
سرعت ظاهری هوا (cm/s)	D	۱/۳	۱/۴	۱/۶	۱/۸	۱/۹
درصد جامد (%)	E	۱۰	۱۵	۲۵	۳۵	۴۰
pH	F	۱/۴۰	۲/۵۰	۴/۷۵	۷	۸/۱۵

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- تحلیل طراحی آزمایش‌ها

هدف از طراحی آزمایش‌ها شناسایی مهم‌ترین تأثیر متغیرهای عملیاتی و همچنین تأثیر متقابل آنها بر خروجی‌های هدف است. خروجی‌های هدف شامل وزن جامد باطله (کف)، وزن آب باطله، عیار سولفور کنسانتره، عیار سولفور باطله است. عیار سولفور باطله، نشانه بسیار

خوبی برای میزان اتلاف آهن در باطله است. به طوری که هرچه عیار سولفور باطله بیشتر باشد، نشان دهنده میزان کمتر انتقال آهن به باطله (اتلاف آهن) است. در این پژوهش، طراحی آزمایش‌های فلوتاسیون و تعیین تأثیر متغیرهای فرآیند بر پاسخ، بر روش سطح پاسخ طرح مرکب مرکزی (به دلیل غیر خطی بودن پاسخ‌ها) و مدل درجه دوم استوار بود. شش عامل در فرآیند فلوتاسیون ستونی در ۵ سطح مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. مقدار آلفا در مدل طراحی آزمایش CCD برابر ۱/۵ در نظر گرفته شد. معناداری تأثیر متغیرها از تحلیل واریانس، با سطح اطمینان ۹۵ درصد به دست آمد.

با انتخاب مدل مناسب و اطمینان از برازش آن و همچنین توزیع مناسب باقی‌مانده‌ها، نتایج حاصل از آزمایش‌ها بررسی شد. برای ارزیابی برازش مدل، ضریب همبستگی ( $R^2$ )، ضریب همبستگی تعدیل‌شده و ضریب تغییرات (CV) مورد استفاده قرار گرفتند. زمانی که مقدار  $R^2$  نزدیک به یک باشد، مدل بیان مناسبی از تغییرات مقادیر آزمایشگاهی را در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده قرار می‌دهد. یکی دیگر از ابزارهای ارزیابی مدل، بررسی نمودار احتمال نرمال است به طوری که قرارگرفتن باقیمانده‌ها در خط مستقیم، نشان‌دهنده توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها است. همچنین نمودار ترسیم‌شده باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر مشاهده‌شده، وابستگی زمانی باقی‌مانده‌ها را نشان می‌دهد به طوری که نمودارهای باقی‌مانده در مقابل داده‌های حاصل از پیش‌بینی نباید از الگوی خاصی پیروی نمایند.

## ۳-۱-۱- تحلیل واریانس بازیابی جامد راه یافته به باطله

به منظور تعیین معناداری مدل و همچنین سطح اهمیت تأثیر عوامل اصلی و متقابل آنها در مدل نهایی، تحلیل واریانس در سطح اعتماد ۹۵ درصد انجام شد که نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در سطح اطمینان ۹۵ درصد (مقدار P کمتر از ۰/۰۵) کاملاً معنادار است. مدل ریاضی درجه دوم برای بازیابی جامد راه یافته به باطله به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Froth Solid weight (gr)} = & +102.63 + \\ & 6.04 A + 8.41 B - 9.89 C + 13.23 D + \\ & 23.88 E + 22.47 F + 4.88AE - 3.81AF + \\ & 3.88BD - 3.50CD + 3.69DE + 8.75EF - \\ & 23.05 F^2 \end{aligned} \quad (1)$$

جدول ۴: آزمایش‌های طراحی شده و پاسخ‌های آن

Std	آزمایش	A	B	C	D	E	F	وزن جامد راه یافته به باطله (gr)	وزن آب راه یافته به باطله (gr)	عیار سولفور کنسانتره (%)	عیار سولفور باطله (%)
۳	۱	-۱	+۱	-۱	-۱	-۱	+۱	۷۰/۰۳	۲۳۵/۰۶	-۰/۲۱	۲۷/۲۱
۳۲	۲	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱	۱۶۰/۰۹	۳۶۰/۰۴	-۰/۱۴	۲۷/۰۲
۱۰	۳	+۱	-۱	-۱	+۱	-۱	-۱	۶۲/۲۱	۲۰/۰۰	-۰/۲۸	۲۰/۲۸
۲۱	۴	-۱	-۱	+۱	-۱	+۱	-۱	۳۵/۰۳	۶۵/۰۸	-۰/۴۲	۱۹/۰۳
۲۴	۵	+۱	+۱	+۱	-۱	+۱	-۱	۷۴/۳۱	۱۷۰/۰۴	-۰/۳۴	۲۳/۱۷
۱	۶	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۴۰/۱۸	۱۴۵/۱۲	-۰/۳۸	۱۳/۱۰
۸	۷	+۱	+۱	+۱	-۱	-۱	+۱	۶۰/۴۴	۱۶۰/۱۹	-۰/۲۸	۲۵/۳۹
۴۴	۸	.	.	.	.	.	+۱/۵	۱۰۰/۰۶	۲۴۰/۲۲	-۰/۲۳	۲۷/۵۰
۳۳	۹	-۱/۵	.	.	.	.	.	۹۱/۱۹	۲۵۰/۲۷	-۰/۱۸	۲۹/۸۶
۴	۱۰	+۱	+۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۴۸/۰۷	۲۲۰/۰۸	-۰/۳۱	۲۰/۳۱
۲۸	۱۱	+۱	+۱	-۱	+۱	+۱	-۱	۱۱۱/۱۷	۳۱۵/۱۵	-۰/۲۴	۲۶/۶۰
۲۷	۱۲	-۱	+۱	-۱	+۱	+۱	+۱	۱۰۹/۰۲	۳۸۰/۲۹	-۰/۱۳	۲۵/۰۲
۳۸	۱۳	.	.	+۱/۵	.	.	.	۹۶/۳۱	۱۷۰/۴۵	-۰/۱۸	۲۹/۶۰
۱۵	۱۴	-۱	+۱	+۱	+۱	-۱	+۱	۸۰/۴۰	۲۸۰/۳۵	-۰/۲۳	۲۴/۰۱
۳۴	۱۵	+۱/۵	.	.	.	.	.	۱۳۰/۲۹	۲۳۵/۲۱	-۰/۰۸	۳۰/۷۰
۴۳	۱۶	.	.	.	.	.	-۱/۵	۱۶/۴۱	۱۱۰/۴۱	-۰/۴۴	۱۸/۷۱
۱۸	۱۷	+۱	-۱	-۱	-۱	+۱	-۱	۷۹/۳۰	۱۶۰/۴۵	-۰/۳۳	۲۸/۳۰
۳۷	۱۸	.	.	-۱/۵	.	.	.	۱۳۰/۲۱	۳۲۰/۴۷	-۰/۱۱	۲۵/۰۳
۲۵	۱۹	-۱	-۱	-۱	+۱	+۱	-۱	۶۶/۴۲	۲۳۰/۰۶	-۰/۳۴	۲۷/۰۵
۳۰	۲۰	+۱	-۱	+۱	+۱	+۱	-۱	۷۵/۲۵	۱۷۵/۳۳	-۰/۳۳	۲۵/۰۳
۳۶	۲۱	.	+۱/۵	.	.	.	.	۱۲۰/۰۷	۳۱۵/۱۶	-۰/۰۸	۳۲/۹۸
۱۴	۲۲	+۱	-۱	+۱	+۱	-۱	+۱	۵۲/۰۵	۱۷۰/۲۱	-۰/۲۲	۲۷/۶۱
۱۳	۲۳	-۱	-۱	+۱	+۱	-۱	-۱	۲۰/۳۶	۱۳۰/۲۳	-۰/۴۲	۱۴/۸۰
۳۹	۲۴	.	.	.	-۱/۵	.	.	۶۰/۱۱	۱۷۰/۱۹	-۰/۲۳	۳۰/۰۳
۱۲	۲۵	+۱	+۱	-۱	+۱	-۱	+۱	۹۰/۰۹	۳۰۵/۲۴	-۰/۱۳	۲۶/۲۲
۲۶	۲۶	+۱	-۱	+۱	-۱	+۱	+۱	۱۵۵/۲۱	۲۷۰/۴۶	-۰/۰۹	۲۸/۲۷
۵	۲۷	-۱	-۱	+۱	-۱	-۱	+۱	۵۴/۰۹	۹۰/۰۳	-۰/۲۸	۲۷/۱۱
۳۵	۲۸	.	.	-۱/۵	.	.	.	۹۸/۳۱	۱۷۵/۰۸	-۰/۱۶	۳۳/۰۸
۴۱	۲۹	.	.	.	.	-۱/۵	.	۴۶/۴۵	۱۸۰/۴۶	-۰/۲۲	۲۸/۰۴
۲۳	۳۰	-۱	+۱	+۱	-۱	+۱	+۱	۱۰۵/۳۱	۲۴۵/۳۸	-۰/۲۷	۲۸/۶۱
۱۱	۳۱	-۱	+۱	-۱	+۱	-۱	-۱	۷۱/۰۷	۳۲۰/۰۶	-۰/۲۶	۲۰/۵۰
۲	۳۲	+۱	-۱	-۱	-۱	-۱	+۱	۵۸/۴۸	۱۹۵/۳۴	-۰/۲۸	۲۶/۲۷
۱۶	۳۳	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱	-۱	۵۲/۵۰	۲۷۵/۲۱	-۰/۳۰	۱۹/۳۰
۲۰	۳۴	+۱	+۱	-۱	-۱	+۱	+۱	۱۳۱/۴۸	۲۶۵/۰۴	-۰/۱۹	۳۰/۲۱
۴۲	۳۵	.	.	.	+۱/۵	.	.	۱۳۹/۳۴	۲۱۰/۱۱	-۰/۱۲	۳۴/۰۳
۷	۳۶	-۱	+۱	-۱	+۱	+۱	-۱	۲۴/۲۶	۱۵۵/۱۴	-۰/۴۰	۱۷/۵۱
۱۷	۳۷	-۱	-۱	-۱	-۱	+۱	+۱	۹۸/۰۳	۲۳۵/۲۳	-۰/۲۸	۲۷/۰۴
۶	۳۸	+۱	-۱	+۱	-۱	-۱	-۱	۲۵/۳۱	۴۰/۴۵	-۰/۴۱	۱۵/۰۱
۳۱	۳۹	-۱	+۱	+۱	+۱	+۱	-۱	۷۰/۱۲	۳۲۰/۴۵	-۰/۳۴	۲۴/۴۰
۲۹	۴۰	-۱	-۱	+۱	+۱	+۱	+۱	۱۱۰/۴۶	۲۳۵/۴۵	-۰/۲۵	۲۷/۰۵
۴۵	۴۱	.	.	.	.	.	.	۱۱۱/۱۳	۲۳۵/۲۱	-۰/۱۲	۳۴/۴۳
۴۰	۴۲	.	.	.	+۱/۵	.	.	۱۲۶/۳۹	۳۳۵/۰۸	-۰/۱۵	۲۳/۳۱
۱۹	۴۳	-۱	+۱	-۱	-۱	+۱	-۱	۵۸/۴۸	۲۷۰/۲۷	-۰/۳۳	۳۱/۷۴
۹	۴۴	-۱	-۱	-۱	+۱	-۱	+۱	۸۵/۰۲	۲۶۰/۱۵	-۰/۱۷	۲۱/۳۸
۲۲	۴۵	+۱	-۱	+۱	-۱	+۱	+۱	۱۰۶/۰۴	۱۶۵/۴۱	-۰/۲۶	۳۳/۰۴

متقابل بین غلظت کلکتور- درصد جامد، غلظت کلکتور- pH، غلظت کف‌ساز- نرخ هوادهی، ارتفاع کف- نرخ هوادهی، نرخ هوادهی- درصد جامد و درصد جامد- pH از نظر آماری در پاسخ آزمایش‌ها معنادار و با اهمیت است.

در مدل بالا تمامی عوامل به صورت کددار هستند. شکل ۷ تأثیر متقابل معنادار هر کدام از عوامل اصلی از پایین‌ترین سطح تا بالاترین سطح را بر میزان جامد راه یافته به باطله نشان می‌دهد. تأثیر همه عوامل اصلی و تأثیر

می‌شود. این امر به دلیل ایجاد جریان مغشوشی است که منجر به تشکیل حباب‌های بزرگ می‌شود. حرکت این حباب‌ها به سمت بالا باعث پایین آمدن پالپ و در نتیجه کاهش بازیابی وزنی جامد می‌شود. افزایش ارتفاع کف باعث ایجاد مقادیر بالاتری از ائتلاف حباب‌ها در کف، آزاد شدن آب و زهکشی بیشتر ذرات جدا شده از کف می‌شود که کاهش میزان جامد راه یافته به باطله را به دنبال دارد. به دلیل افزایش نرخ زهکشی آب بیشتری در حاشیه‌های حباب (Plateau) ایجاد می‌شود که مقدار ذرات جدا شده از سطح حباب را افزایش می‌دهد.

در pH های بالا به دلیل پایداری بیشتر کف و بیشتر بودن قدرت حمل ذرات توسط حباب‌ها، نرخ جامد راه یافته به باطله افزایش می‌یابد. افزایش درصد جامد به طور چشم‌گیری موجب افزایش وزن جامد انتقال داده شده به باطله می‌شود، زیرا با افزایش جامد پالپ ورودی میزان ذرات آب‌گریز در پالپ افزایش می‌یابد. همچنین وجود ذرات جامد پالپ موجب پایداری بیشتر کف شده و از انهدام آنها و برگشت ذرات به فاز پالپ جلوگیری می‌کند.

در شکل ۷ مشاهده می‌شود که تأثیر افزایش غلظت کلکتور بر وزن جامد راه یافته به باطله در درصد جامدهای پایین ناچیز، ولی در درصد جامدهای بالا کاملاً مشهود است. زیرا در درصد جامدهای بالا نیاز به غلظت‌های بالاتری از کلکتور برای آب‌گریزی ذرات موجود در پالپ است. در pH های اسیدی، تأثیر غلظت کلکتور بر بازیابی جامد برجسته‌تر است به طوری که در مقادیر pH خنثی، افزایش غلظت کلکتور موجب افزایش ناچیز میزان جامد راه یافته به باطله می‌شود. علت این پدیده را می‌توان مربوط به نحوه عملکرد کلکتور گزینتات در pH های مختلف دانست. از آن جایی که در pH های اسیدی، کلکتور گزینتات به اسید زانتیک و سپس به دی سولفید کربن و الکل تجزیه می‌شود لذا میزان غلظت کلکتور تأثیر بالایی در بازیابی ذرات جامد دارد.

تأثیر دوگانه نرخ هوا- درصد جامد بر میزان بازیابی جامد باطله، مشابه تأثیر کف‌ساز- نرخ هوا است. نرخ افزایش جامد راه یافته به باطله با افزایش نرخ هوادهی در سطوح بالای کف‌ساز و درصد جامد برجسته‌تر است. در سطوح پایین هوا تغییرات ارتفاع کف تأثیر چندانی بر بازیابی جامد باطله ندارد، ولی در سطوح بالای هوا بازیابی جامد با کاهش ارتفاع کف با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.

افزایش غلظت کلکتور تأثیر مثبت بر روی بازیابی جامد کف دارد که این امر به دلیل افزایش آب‌گریزی و جمع‌آوری بیشتر ذرات پیریت و پایداری بیشتر کف است. با افزایش غلظت کف‌ساز، میزان جامد راه یافته به باطله (کف) افزایش می‌یابد.

جدول ۵: تحلیل واریانس مدل جامد راه یافته به باطله

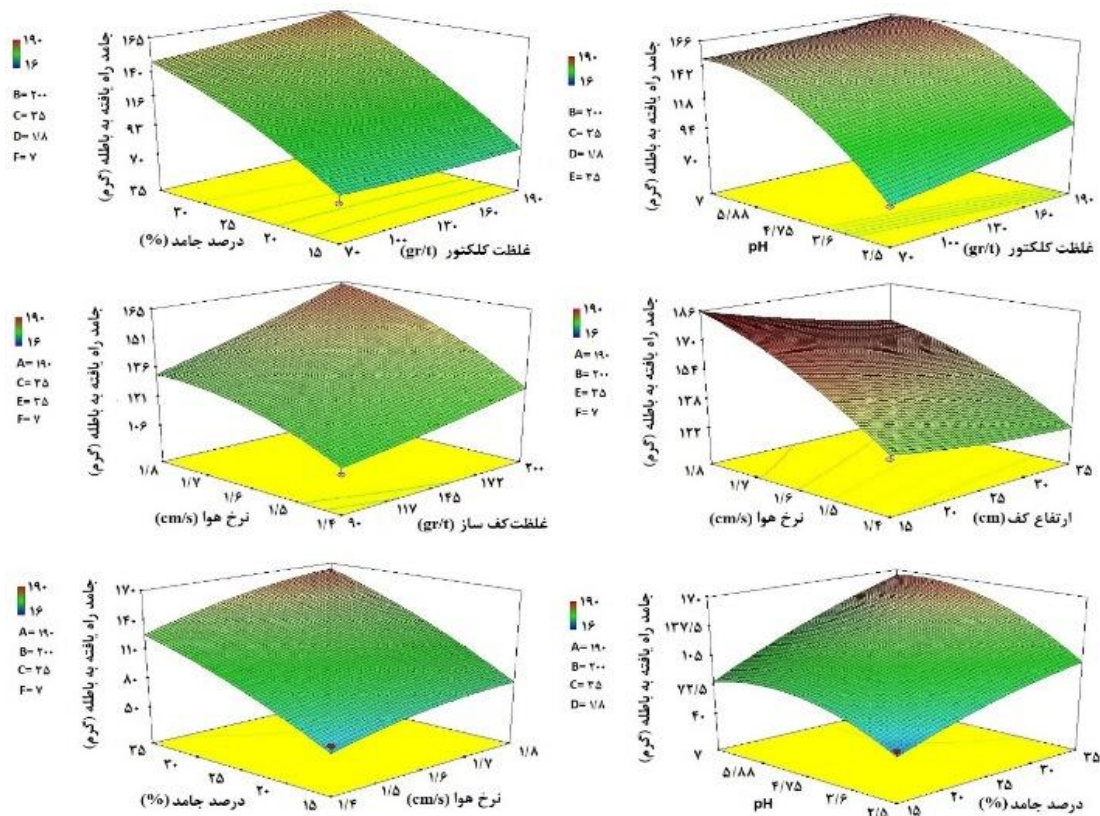
عامل	میانگین مربعات	df	F	P
مدل	۴۹۸۰/۲۵	۱۳	۴۱/۷۷	<۰/۰۰
A	۱۳۳۲/۱۷	۱	۱۱/۸۵	۰/۰۰
B	۲۵۸۲/۳۷	۱	۲۱/۶۶	۰/۰۰
C	۳۵۷۰/۱۳	۱	۲۹/۹۵	<۰/۰۰
D	۶۳۹۱/۵۱	۱	۵۳/۶۱	<۰/۰۰
E	۲۰۸۰۸/۴۲	۱	۱۷۴/۵۵	<۰/۰۰
F	۱۸۴۲۱/۸۸	۱	۱۵۴/۰۱	<۰/۰۰
AE	۷۶۰/۰۳	۱	۶/۷۷	۰/۰۲
AF	۴۶۵/۱۳	۱	۴/۱۴	۰/۰۵
BD	۴۸۰/۰۳	۱	۴/۲۸	۰/۰۴
CD	۴۴۰/۷۸	۱	۳/۹۹	۰/۰۵
DE	۴۵۵/۱۳	۱	۴/۰۵	۰/۰۵
EF	۲۴۵۰/۲۸	۱	۲۰/۵۵	۰/۰۰
F <sup>2</sup>	۶۶۵۱/۳۱	۱	۵۵/۷۴	<۰/۰۰
Adj R <sup>2</sup> = ۰/۹۲	Pred R <sup>2</sup> = ۰/۸۹	C.V. % = ۱۳/۰۱		

افزایش در بازیابی جامد به دلیل افزایش محتوی آب در کف اتفاق می‌افتد که منجر به نرخ انتقال بالاتر جامد و افزایش میزان دنباله‌روی ذرات به باطله می‌شود. از طرف دیگر، افزودن کف‌ساز منجر به کاهش ابعاد حباب و در نتیجه باعث افزایش مساحت سطح ویژه حباب در فاز پالپ شده و شانس ذرات آب‌دوست را برای شناور شدن به سطح سلول افزایش می‌دهد، که این مسئله می‌تواند منجر به افزایش بازیابی وزنی جامد کف شود. کاهش وزن جامد و آب راه یافته به باطله در نرخ های پایین کف‌ساز به دلیل ناپایداری حباب‌های کف و برگشت ذرات به فاز پالپ است. زمانی که نرخ هوای ستون فلوتاسیون افزایش یا ارتفاع کف کاهش یابد، نرخ انتقال کف در حال حرکت به سمت سرریز افزایش می‌یابد که منجر به یک افزایش در بازیابی جامد کف می‌شود. همچنین بخش بیشتری از مواد آب‌دوست تحت تأثیر دنباله‌روی همراه با کف از لبه سلول سرریز می‌شوند. با افزایش میزان هوا از ۱/۹ سانتی‌متر بر ثانیه، به تدریج از مقدار جامد راه یافته به باطله کاسته



pHهای بالا برجسته‌تر است.

نکته قابل مشاهده دیگر این است که نرخ افزایش بازیابی جامد فلوتاسیون در اثر افزایش درصد جامدپالپ، در



جدول ۶: افت فشار ایجاد شده در دبی‌های مختلف

جدول ۶: تحلیل واریانس مدل بازیابی آب باطله

عامل	میانگین مربعات	df	F	P
مدل	۲۰۷۴۶/۰۶	۱۲	۴۶/۶۹	<۰/۰۰
B	۸۱۰۵۲	۱	۱۹۴/۱۷	<۰/۰۰
C	۳۹۱۲۴	۱	۹۳/۷۰	<۰/۰۰
D	۷۵۲۶۸/۶۶	۱	۱۸۰/۲۲	<۰/۰۰
E	۱۴۴۰۰/۷۰	۱	۳۴/۴۹	<۰/۰۰
F	۲۰۰۲۸/۱۰	۱	۴۷/۹۷	<۰/۰۰
BC	۲۴۵۰	۱	۵/۸۷	۰/۰۲
BD	۲۱۱۲/۵۰	۱	۵/۰۷	۰/۰۳
BF	۲۶۲۸/۱۳	۱	۶/۲۹	۰/۰۲
CD	۲۸۱۲/۵۱	۱	۶/۷۴	۰/۰۱
EF	۱۸۰۰	۱	۴/۳۱	۰/۰۴
E <sup>2</sup>	۱۳۹۱/۰۱	۱	۳/۸۷	۰/۰۵
F <sup>2</sup>	۴۶۴۶/۱۱	۱	۱۱/۱۳	۰/۰۰
Adj R <sup>2</sup> = ۰/۹۳	Pred R <sup>2</sup> = ۰/۸۹	C.V. % = ۹/۲۱		

نتایج نشان داد نرخ هوادهی و کف‌ساز، بیشترین تأثیر را در میزان آب راه یافته به باطله دارند. تحت همه شرایط آزمایش‌ها، بازیابی آب با افزایش نرخ هوا افزایش می‌یابد زیرا یک افزایش در نرخ هوا نسبت آب به جامد وارد شده به کف را افزایش می‌دهد.

۳-۱-۲- تحلیل واریانس بازیابی آب راه یافته به باطله

مدل برازش شده برای تحلیل واریانس آب راه یافته به باطله از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است و بر اساس آزمون فیشر، مقدار P مدل کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد. مدل ارائه شده برای بازیابی آب عملیات به صورت رابطه (۲) است:

$$\begin{aligned} \text{Froth Water weight (gr)} = & +246.52 + \\ & 47.12B - 32.74C + 45.41D + 19.86E + \\ & 23.42F + 8.75BC + 8.13BD - 9.06BF + \\ & 9.38CD + 7.50EF - 10.74E^2 - 19.63F^2 \end{aligned} \quad (2)$$

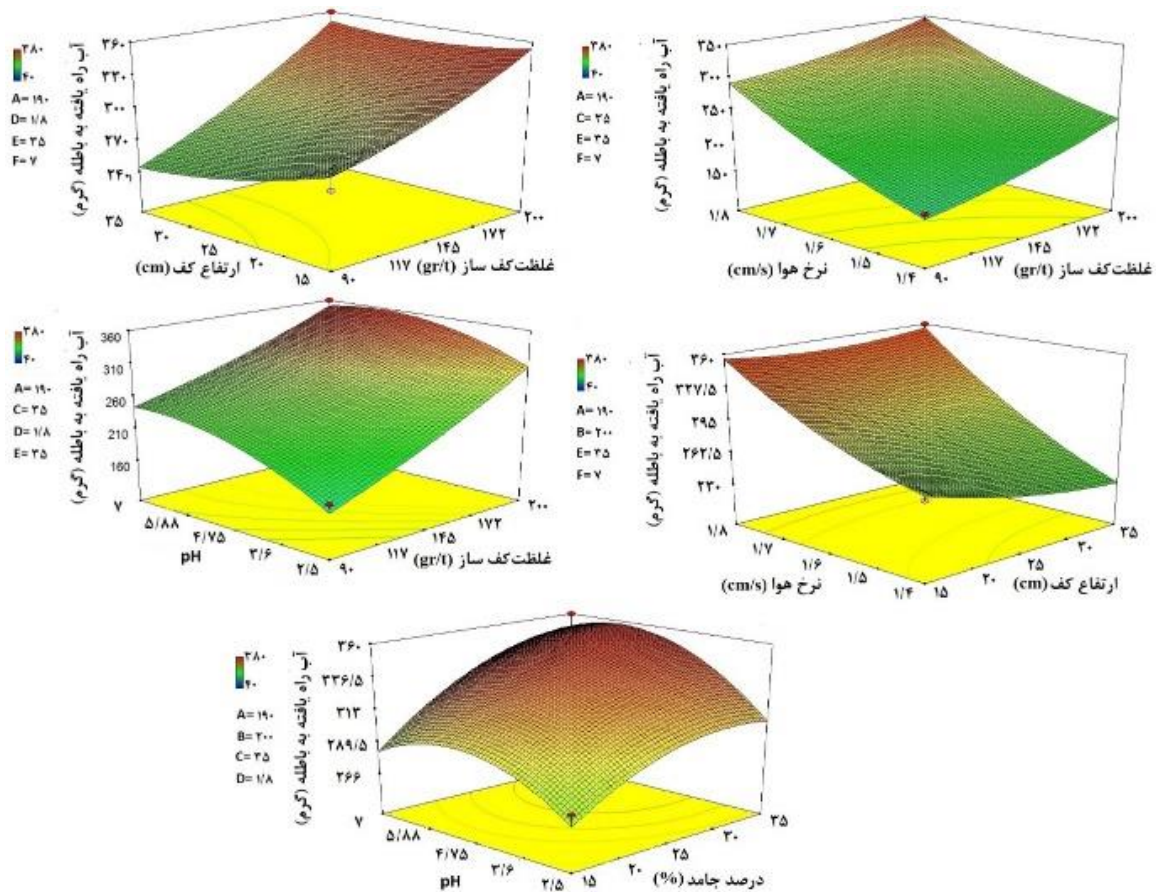
تأثیر همه عوامل اصلی به جز میزان غلظت کلکتور و تأثیرهای دوگانه کف‌ساز- ارتفاع کف، کف‌ساز- pH، کف‌ساز- نرخ هوادهی، ارتفاع کف- نرخ هوادهی و درصد جامد- pH در میزان آب راه یافته به باطله از نظر آماری معنادار است (جدول ۶).

ضعیف بین گروه‌های قطبی و ملکول‌های آب تشکیل می‌شود. دانسیته‌های جذب بالا منجر به ائتلاف بیشتر گروه‌های قطبی با سطح مشترک هوا/آب می‌شود، بنابراین آب بیشتری را به فاز کف انتقال می‌دهد.

شکل ۸ نشان می‌دهد که در مقادیر پایین کف‌ساز، تغییرات ارتفاع کف تأثیر بیشتری بر بازیابی آب فلوتاسیون دارد و تأثیر ارتفاع کف در مقادیر بالای کف‌ساز ناچیز است. در نرخ‌های پایین هوا، نقش کف‌ساز در میزان بازیابی آب برجسته‌تر است. افزایش نرخ هوا نسبت آب به جامد وارد شده به کف را به شدت افزایش می‌دهد، بنابراین تأثیر غلظت کف‌ساز در نرخ‌های بالای هوا تضعیف می‌شود.

افزایش ارتفاع کف موجب توسعه ساختار کف و زهکشی بیشتر می‌شود، بنابراین کاهش ارتفاع کف تأثیر مثبت بر آب راه‌یافته به سرریز دارد. با افزایش درصد جامد میزان آب راه‌یافته به سرریز افزایش می‌یابد. آب راه‌یافته به باطله با افزایش pH روند صعودی داشته و در pH حدود ۵ بیشینه بازیابی آب به دست می‌آید، سپس در pH‌های قلیایی اندکی کاهش می‌یابد.

غلظت کف‌ساز حاضر در محلول، بر میزان جذب کف‌ساز بر سطح هوا-آب تأثیر می‌گذارد. همچنان‌که غلظت کف‌ساز در پالپ افزایش می‌یابد، دانسیته‌های جذب بالاتر کف‌ساز در سطح هوا-آب رخ می‌دهد. مولکول‌های کف‌ساز در سطح مشترک آب/هوا از باندهای هیدروژنی



شکل ۸: تأثیر متقابل میان متغیرهای عملیاتی و آب راه‌یافته به باطله

### ۳-۱-۳- تحلیل واریانس عیار سولفور کنسانتره

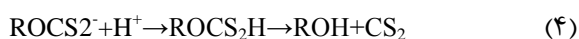
نتایج تحلیل واریانس حاصل از طراحی آزمایش‌ها نشان داد که مدل پیشنهادی برای عیار سولفور کنسانتره از نظر آماری (در سطح اعتماد ۹۵ درصد) معنادار است. مدل پیشنهادی برای عیار سولفور کنسانتره مطابق با رابطه (۳) است.

در همه مقادیر pH با افزایش میزان کف‌ساز، نرخ بازیابی آب افزایش می‌یابد ولی نسبت افزایش آن در pH‌های پایین بیشتر است. در نرخ‌های بالای هوا، میزان آب راه‌یافته به باطله مستقل از ارتفاع کف است ولی در نرخ‌های پایین هوا با افزایش ارتفاع کف میزان آب راه‌یافته به باطله کاهش می‌یابد. نرخ افزایش آب بازیابی شده با افزایش درصد جامد، در pH‌های بالاتر بیشتر است.

باعث کاهش بارگذاری حباب می‌شود ولی از طرف دیگر افزایش شار جامد می‌تواند ذرات جدا شده را تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی به باطله (کف) انتقال دهد و موجب کاهش عیار سولفور کنسانتره شود.

در مقادیر بالاتر از ۱/۹ سانتی‌متر بر ثانیه به دلیل افزایش در ائتلاف حباب‌ها (تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر) و تبدیل جریان حبابی به مغشوش، بازیابی پیریت روند کاهشی به خود می‌گیرد. این مقدار بهینه برای سرعت ظاهری گاز در نتایج تحقیقات فلوتاسیون ستونی توسط محققان دیگر مشاهده شده است.

با کاهش ارتفاع کف، میزان حذف پیریت افزایش می‌یابد که می‌تواند به کاهش برگشت ذرات از فاز کف به فاز پالپ و همچنین کاهش زمان ماند ذرات در ناحیه کف مربوط باشد. بیشترین و کمترین میزان حذف پیریت در pH برابر ۴/۷۵ و ۲/۵ به دست آمد. بازداشت پیریت در pH کمتر از ۳ به تجزیه گزنتات به اسید زانتیک و سپس به دی سولفید کربن و الکل (مطابق رابطه ۴) مربوط می‌شود.



وجود یون‌های فریک ناشی از ذرات کانی‌های اکسیدی آهن به شدت احتمال این تجزیه را افزایش می‌دهد. هرچند در بسیاری از مقالات به این تجزیه اشاره نشده است. به دلیل پایداری کم هیدروکسیدهای فریک در محیط‌های اسیدی متوسط، این یون‌ها در محلول آزاد شده و تبدیل گزنتات به دیگزانتوژن را راحت می‌کنند، بنابراین پیریت در pH حدود ۴/۷۵ به خوبی شناور می‌شود [۱۳].

از نمودارهای تأثیر دوگانه متغیرها (شکل ۹)، مشاهده شد که میزان کاهش عیار سولفور کنسانتره با افزایش میزان کلکتور، در پالپ‌های با درصد جامد بالاتر چشمگیرتر است. بدین ترتیب کمترین میزان عیار سولفور کنسانتره در درصد جامد ۳۵ و غلظت کلکتور برابر ۱۹۰ گرم بر تن به دست آمد. دلیل آن این است که افزایش درصد جامد باعث افزایش پایداری حباب‌ها، ناشی از حضور غلظت‌های بالای ذرات آب‌گریز در سطح کف می‌شود و در درصد جامدهای بالا نیاز به غلظت بالاتری از کلکتور برای آب‌گریزی ذرات است. تغییرات ارتفاع کف در نرخ‌های بالای هوا تأثیر چشمگیری بر میزان سولفور کنسانتره دارد. نرخ کاهش عیار سولفور کنسانتره با تغییرات نرخ هوا در pH‌های بالاتر برجسته‌تر است.

$$\begin{aligned} \text{Concetrated S content (\%)} = & +0.13 - \\ & 0.020A - 0.021B + 0.028C - 0.033D - \\ & 0.011E - 0.064F - 9.03 \times 10^{-3}AE + 7.33 \times \\ & 10^{-3}CD - 8.59 \times 10^{-3}DF + 0.028D^2 + \\ & 0.021E^2 + 0.094F^2 \end{aligned} \quad (3)$$

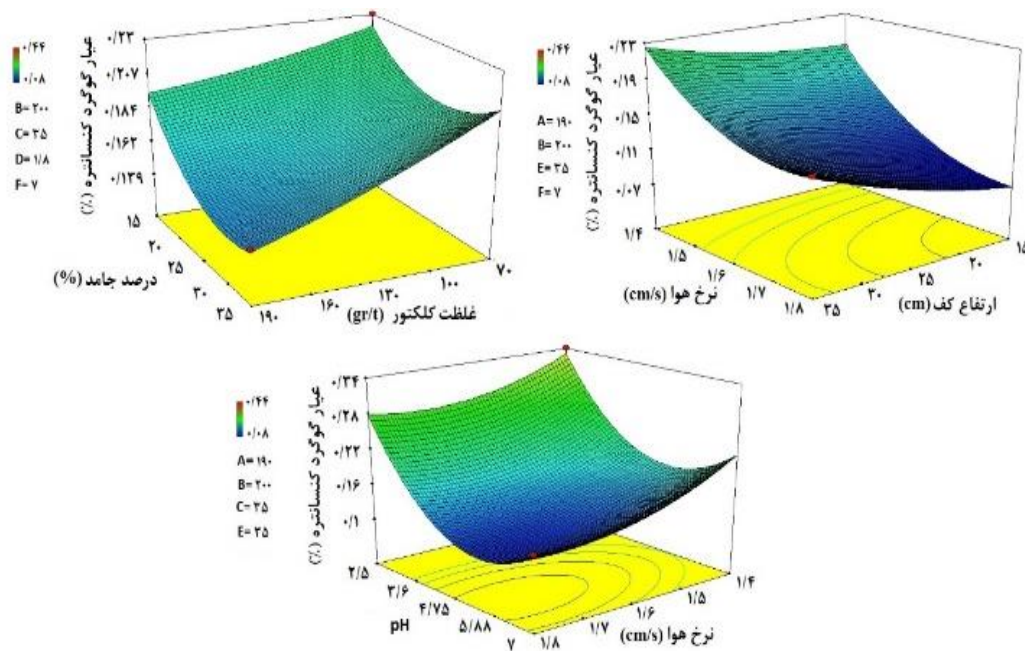
همچنین تأثیر همه عوامل اصلی و تأثیر متقابل غلظت کلکتور- درصد جامد، ارتفاع کف- نرخ هوادهی و نرخ هوادهی- pH بر میزان عیار سولفور کنسانتره از نظر آماری معنادار است (جدول ۷).

جدول ۷: تحلیل واریانس مدل عیار سولفور کنسانتره

عامل	میانگین مربعات	df	F	P
مدل	۰/۰۳۵	۱۵	۸۳/۱۳	<۰/۰
A	۰/۰۱۵	۱	۳۵/۵۵	<۰/۰۰
B	۰/۰۱۶	۱	۳۸/۱۰	<۰/۰۰
C	۰/۰۳	۱	۶۹/۶۰	<۰/۰۰
D	۰/۰۴	۱	۹۵/۲۵	<۰/۰۰
E	$۴/۷ \times 10^{-3}$	۱	۱۱/۲۰	۰/۰۰
F	۰/۱۵	۱	۳۵۵	<۰/۰۰
AE	$۲/۶ \times 10^{-3}$	۱	۶/۲۱	۰/۰۲
CD	$۱/۷ \times 10^{-3}$	۱	۴/۱۱	۰/۰۵
DF	$۲/۳ \times 10^{-3}$	۱	۵/۶۰	۰/۰۳
D <sup>2</sup>	۰/۰۱	۱	۲۳/۹۱	<۰/۰۰
E <sup>2</sup>	$۵/۹ \times 10^{-3}$	۱	۱۳/۹۸۰	۰/۰۰
F <sup>2</sup>	۰/۱۱	۱	۲۵۵/۸۰	<۰/۰۰
Adj R <sup>2</sup> = ۰/۹۵ Pred R <sup>2</sup> = ۰/۹۲ C.V. % = ۸/۲۸				

با افزایش غلظت کلکتور میزان حذف پیریت (کاهش عیار سولفور کنسانتره) افزایش می‌یابد که آن را می‌توان به افزایش میزان آب‌گریزی ذرات پیریت نسبت داد. با افزایش میزان کف‌ساز، بازیابی جامد به دلیل افزایش محتوی آب و افزایش مساحت سطح ویژه حباب‌ها در کف افزایش می‌یابد. این عمل منجر به افزایش پایداری و کاهش عیار سولفور کنسانتره می‌شود.

عملکرد متالورژیکی هر سیستم فلوتاسیون ستونی به طور قابل ملاحظه‌ای به سرعت ظاهری هوا و ارتفاع کف وابسته است. با افزایش سرعت ظاهری هوا تا حدود ۱/۸ سانتی‌متر بر ثانیه، بازیابی پیریت به دلیل افزایش ماندگی گاز و برخورد ذره- حباب افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سرعت ظاهری هوا سبب کاهش زمان ماند ذرات در فاز کف شده و بازیابی افزایش می‌یابد. تأثیر ناپایداری حباب که در زمان افزایش نرخ هوا مشاهده می‌شود به احتمال زیاد به دلیل افزایش زهکشی ذرات جدا شده از حباب‌هاست که



شکل ۹: تأثیر متقابل میان متغیرهای عملیاتی و عیار سولفور کانسانتزه

افزایش می‌یابد، این روند در pH حدود ۷ قابل مشاهده است ولی در pH حدود ۲/۵ عیار سولفور کف به دلیل کاهش شدید پایداری کف، کاهش می‌یابد. به این دلیل تأثیر ارتفاع کف بر عیار کف به طور مجزا معنادار نیست. نتایج مشابه برای نرخ هوا و میزان کف ساز مشاهده شد.

جدول ۸: تحلیل واریانس مدل عیار سولفور باطله

عامل	میانگین مربعات	df	F	P
مدل	۹۵/۷۳	۱۱	۲۱/۱۸	<۰/۰۰
A	۲۱/۳۴	۱	۴/۷۲	۰/۰۴
E	۲۴۴/۰۲	۱	۵۴/۰۵	<۰/۰۰
F	۲۶۶/۵۲	۱	۵۸/۹۳	<۰/۰۰
AB	۲۴/۶۹	۱	۵۴/۴۷	۰/۰۳
BF	۱۹/۸۰	۱	۴/۳۸	۰/۰۴
CF	۴۴/۴۹	۱	۹/۸۴	۰/۰۰
DF	۲۴/۸۳	۱	۵/۴۹	۰/۰۳
EF	۵۹/۱۶	۱	۱۳/۰۸	۰/۰۰
C <sup>2</sup>	۳۷/۸۳	۱	۸/۳۶	۰/۰۱
D <sup>2</sup>	۵۰/۶۶	۱	۱۱/۲۰	۰/۰۰
F <sup>2</sup>	۱۵۷/۳۳	۱	۳۴/۸۵	<۰/۰۰
Adj R <sup>2</sup> = ۰/۸۳ Pred R <sup>2</sup> = ۰/۷۶ C.V. % = ۸/۲۸				

بارگذاری جامد بر روی سطح کف یک عامل کلیدی در ارتباط با عملکرد فلوتاسیون است. انتظار بر این است که عیار باطله به طور مستقیم با بارگذاری ذرات بر روی سطح حباب‌ها ارتباط داشته باشد. به طور کلی یک افزایش در بارگذاری ذرات متناظر با یک افزایش در عیار کف خواهد بود. با این وجود ارتباط بین بارگذاری جامد حباب‌ها و

### ۳-۴- تحلیل واریانس عیار سولفور کف

با انتخاب مدل مناسب و اطمینان از برازش مدل و همچنین توزیع مناسب باقیمانده‌ها، نتایج عیار سولفور باطله حاصل از آزمایش‌ها بررسی شد. بر اساس تحلیل واریانس تست فیشر، مقادیر P کوچکتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که مدل برای عیار سولفور باطله معنادار است. مدل ریاضی به دست آمده از طراحی آزمایش‌ها برای عیار سولفور کف در رابطه ۵ آورده شده است.

$$\text{Froth } S \text{ content } (\%) = 31.72 + 0.76A + 2.59E + 2.70F - 0.88AB - 0.79BF + 1.18CF - 0.88DF - 1.36EF - 1.80C^2 - 2.09D^2 - 3.67F^2 \quad (5)$$

برای تمامی پاسخ‌های معنادار، مقادیر F و P مربوط به هر یک از عوامل در جدول ۸ نشان داده شده است. تأثیر غلظت کلکتور، درصد جامد و pH به عنوان عوامل اصلی و تأثیر متقابل غلظت کلکتور- غلظت کف‌ساز، ارتفاع کف- pH، نرخ هوادهی- pH و درصد جامد - pH از نظر آماری در پاسخ عیار سولفور باطله آزمایش‌ها معنادار است.

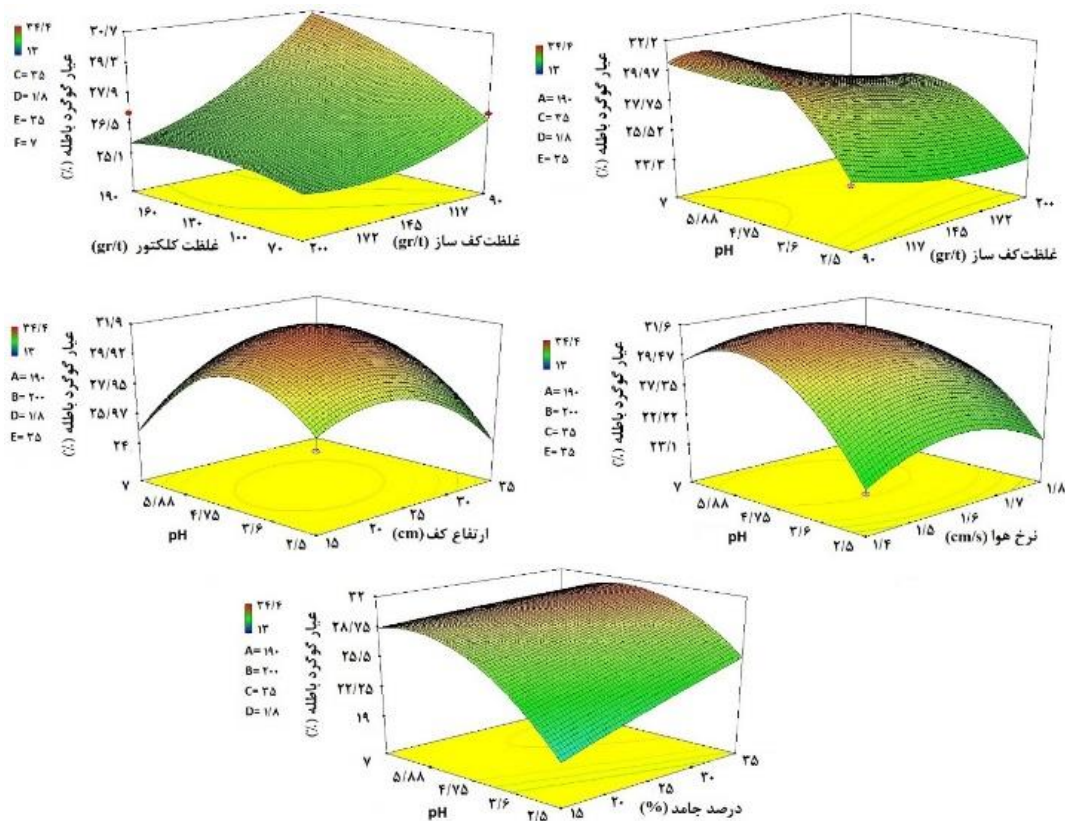
بر اساس پژوهش‌های انجام شده در عملیات فلوتاسیون، به طور کلی متغیرهای ارتفاع کف، نرخ جریان هوا و میزان کف‌ساز تأثیر معنادار بر روی عیار کف دارند، ولی در این پژوهش تأثیر متقابل آنها با pH معنادار است. مطالعات گذشته نشان داده‌اند که با افزایش ارتفاع کف، عیار کف

افزایش کلکتور و درصد جامد موجب افزایش عیار سولفور کف می‌شود. البته تأثیر درصد جامد بسیار چشمگیرتر است. با افزایش pH تا حدود ۵ عیار سولفور کف افزایش و سپس اندکی کاهش می‌یابد.

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در مقادیر بالای کف‌ساز، عیار سولفور باطله با افزایش مقدار کلکتور از روند نسبتاً ثابتی برخوردار است ولی در نرخ‌های پایین کف‌ساز، تأثیر میزان کلکتور بر عیار سولفور کاملاً مشهود است. همچنین در نرخ‌های بالای کلکتور، کاهش عیار سولفور باطله با افزایش نرخ کف‌ساز بسیار چشمگیرتر از نرخ‌های پایین کلکتور است.

بازیابی وزنی جامد به عوامل زیادی مانند ساختار کف (اندازه حباب) و نرخ انتقال کف (سرعت و پایداری) وابسته است. با فرض اینکه نرخ انتقال کف و اندازه حباب به طور مشابه باقی بمانند، یک افزایش در بارگذاری جامد با یک افزایش در بازیابی جامد متناظر خواهد بود. با این وجود تحت شرایطی که در آن یا اندازه حباب افزایش یا سرعت کاهش یابد، یک افزایش در بارگذاری جامد می‌تواند با یک کاهش در بازیابی جامد همراه باشد.

افزایش نرخ هوا، کاهش پایداری سطح کف را به دنبال دارد که می‌تواند با کاهش بارگذاری ذرات بر روی حباب‌های وارد شده به کف توضیح داده شود. از طرف دیگر افزایش در نرخ هوا منجر به افزایش شار جامد راه یافته به کف و کاهش عیار سولفور باطله می‌شود.



شکل ۱۰: تأثیر متقابل میان متغیرهای عملیاتی و عیار سولفور باطله

افزایش ارتفاع کف، افزایش عیار سولفور باطله را به دنبال دارد. ارتفاع کف بالا زمان ماند ذرات در فاز کف را افزایش می‌دهد که منجر به زهکشی بیشتر لاملا در سطح کف می‌شود. بنابراین لاملای حباب نازک‌تر و شکننده‌تر شده که منجر به ناپایداری بیشتر حباب‌ها می‌شود. در pHهای اسیدی قوی با افزایش ارتفاع کف پایداری به شدت کاهش یافته و در نتیجه میزان بارگذاری حباب و همچنین نرخ

قابل انتظار است که با افزایش غلظت کف‌ساز، بازیابی جامد افزایش و عیار سولفور باطله کاهش یابد و نرخ کاهش در pH خنثی برجسته‌تر است. کاهش در عیار باطله به دلیل افزایش ذرات دنباله‌روی شده‌ای است که با آب اضافی انتقال داده شده به کف بازیابی می‌شوند.

در pHهای اسیدی قوی (۲/۵) با کاهش ارتفاع کف، عیار سولفور باطله افزایش می‌یابد ولی در pHهای بالاتر

بنابراین بهینه‌سازی نسبت به اهداف می‌تواند در جهت کمینه یا بیشینه کردن یک یا چند پاسخ باشد. وضعیت مطلوب برای آزمایش‌های طراحی شده رسیدن به شرایطی است که در آن میزان سولفور در کنسانتره کمترین مقدار باشد و در عین حال میزان اتلاف آهن کمینه شود. به دلیل پیچیدگی فرآیند فلوتاسیون ستونی و تأثیر پارامترها و اندرکنش‌های مختلف که در فلوتاسیون پیریت بر پاسخ سیستم وجود دارد، بین سطوح بهینه عوامل برای کمینه عیار سولفور کنسانتره و بیشینه عیار سولفور در باطله (کمینه بازیابی آهن در محصول شناور) هماهنگی وجود ندارد. به عبارت دیگر در برخی از شرایطی از سطوح متغیرها که منجر به کمینه عیار سولفور کنسانتره (بیشینه بازیابی) می‌شود، بیشترین بازیابی آهن (اتلاف) در محصول شناور شده حاصل می‌شود.

بهینه‌سازی شرایط فلوتاسیون ستونی با کمینه‌کردن عیار سولفور کنسانتره و بیشینه‌کردن عیار سولفور باطله با استفاده از روش طراحی آماری آزمایش‌ها و تحلیل آماری نتایج مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بهینه‌سازی پاسخ‌ها در جدول ۹ نشان داده شده است. بر اساس پیش‌بینی مدل، در شرایط بهینه، تولید کنسانتره‌ای با عیار سولفور برابر ۰/۰۸ درصد با کارایی جدایش معادل ۸۴ درصد قابل دستیابی است.

انتقال ذرات جامد و عیار سولفور باطله کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در pHهای بالاتر افزایش ارتفاع کف منجر به افزایش میزان ائتلاف حباب‌ها و آزاد شدن آب و زهکشی بیشتر ذرات دنباله‌روی شده و در نهایت افزایش عیار می‌شود.

در pH برابر ۲/۵، افزایش نرخ هوادهی تا ۱/۶ سانتی‌متر بر ثانیه منجر به افزایش عیار سولفور کف می‌شود و پس از آن با افزایش هوا اندکی از میزان آن کاسته می‌شود ولی در pHهای بالاتر با افزایش نرخ هوا به تدریج عیار سولفور کف کاهش می‌یابد. نرخ کاهش عیار سولفور باطله با افزایش دبی هوا در pHهای خنثی بیشتر است. به طور کلی با افزایش نرخ هوای ستون فلوتاسیون، نرخ انتقال کف به سمت سرریز ستون افزایش می‌یابد که منجر به یک افزایش در بازیابی جامد و کاهش در عیار کف می‌شود.

نتایج نشان داد که در مقادیر بالای pH، تغییرات درصد جامد تأثیر چندانی بر عیار سولفور باطله ندارد. حال آنکه در مقادیر pH برابر ۲/۵، افزایش درصد جامد افزایش عیار سولفور باطله را در پی دارد. در pHهای اسیدی قوی به دلیل پایداری کمتر کف، کاهش درصد جامد منجر به ناپایداری بیش از حد کف شده و عیار کاهش می‌یابد.

### ۳-۲- بهینه‌سازی عملیات فلوتاسیون ستونی

نظر به اینکه بهینه‌سازی در روش‌های سطح-پاسخ، یافتن شرایط بهینه برای پاسخ‌ها در فضای طراحی است،

جدول ۹: سطوح بهینه پارامترها

A	B	C	D	E	F	عیار سولفور کنسانتره (درصد)	کارایی جدایش (درصد)	مطلوبیت
۱۵۰	۲۰۰	۲۰	۱/۶	۳۰	۴/۹	۰/۰۸	۸۲/۸۱	۰/۹۹

از روش CCD، با انجام آزمایش‌های اعتبارسنجی تأیید شد. در واقع آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی نشان داد که در شرایط بهینه، دستیابی به کنسانتره نهایی با عیار سولفور کمتر از ۰/۰۸ درصد، با بازیابی آهن بالای ۹۸ درصد ممکن است.

جدول ۱۰: نتایج آزمایش‌های اعتبارسنجی با سطوح بهینه

آزمایش	عیار سولفور کنسانتره	کارایی جدایش (درصد)
۱	۰/۰۹۷	۷۹/۳۱
۲	۰/۰۸۷	۸۱/۴۲

شرایط بهینه، شامل ۱۵۰ گرم بر تن کلکتور، ۲۰۰ گرم بر تن کف‌ساز، ارتفاع کف ۲۰ سانتی‌متر، سرعت ظاهری هوا ۱/۶ سانتی‌متر بر ثانیه، درصد جامد ۳۰ و pH برابر ۴/۹ به دست آمد. لازم به ذکر است متناسب با تغییر شرایط بهینه، می‌توان پاسخ‌های مورد نظر را از فرآیند دست آورد. این گونه پاسخ‌ها که با توجه به مدل حاکم بر فرآیند تعیین می‌شوند، از مزایای به کارگیری روش‌های طراحی آزمایش‌ها و تحلیل آماری نتایج هستند.

به منظور تأیید پیش‌بینی مدل، دو آزمایش شاهد با شرایط بهینه مذکور انجام شد که نتایج آن در جدول ۱۰ آورده شده است. نتایج بهینه‌سازی به دست آمده با استفاده

یافته به باطله، آب راه یافته به باطله، عیار سولفور کنسانتره و باطله بودند.

میزان کلکتور، درصد جامد، pH و تأثیر دوگانه نرخ هوا-pH به طور مشترک بر عیار سولفور کنسانتره و باطله (میزان اتلاف آهن) دارای تاثیر معنادار بودند. تأثیر pH و درصد جامد برای پاسخ‌های عیار سولفور باطله و pH، ارتفاع کف و نرخ هوای ورودی بر میزان عیار سولفور کنسانتره از معناداری بیشتری برخوردار بودند.

شرایط بهینه با کمینه‌سازی عیار سولفور در کنسانتره و بیشینه کردن آن در باطله حاصل شد. با اعمال شرایط بهینه عملیاتی (150 gr/t = کلکتور، 200 gr/t = کف‌ساز، pH = 4/9، 1/6 cm/s = هوای ورودی، 30 = درصد جامد، 20 cm = ارتفاع کف)، کنسانتره‌ای با محتوی سولفور 0/08 با عیار و بازیابی آهن حدود 64 و 98 درصد به دست آمد. همچنین تأثیر اضافه کردن سولفات مس به منظور فعال‌سازی سطح پیریت در شرایط بهینه بررسی شد و نتایج نشان داد که استفاده از سولفات مس تأثیری بر کاهش عیار سولفور کنسانتره در شرایط بهینه ندارد.

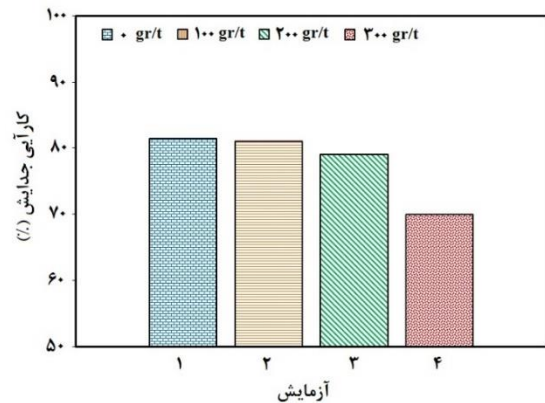
#### ۵- سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر و پژوهشکده سنگ آهن و فولاد به خاطر همکاری صمیمانه، تشکر و سپاسگزاری نمایند.

#### مراجع

- [1] Jameson, G. J., 1988. A new concept in flotation column design, Proceedings of an International Symposium on Column Flotation, 281-286.
- [2] Finch J. A. and Dobby, G. S., 1990. Column flotation: A selected review. Part I, International Journal of Mineral Processing, 38, 343-354.
- [3] Araujo, A.C. Viana, P.R.M., Peres, A.E.C., 2005. Reagents in iron ores flotation, Miner. Eng., 18, 219-224.
- [4] Rath, S.S., Sahoo, H., Das, S.K., Das, B., Mishra B.K., 2014. Influence of band thickness of banded hematite quartzite (BHQ) ore in flotation. International Journal of Mineral Processing, 130, 48-55.
- [5] Arvidson, B., Klemetti, M., Knuutinen, T., Kuusisto, M., Man, Y.T., Hughes-Narborough, C.,

پژوهش‌های انجام شده در مورد فعال‌سازی سطح پیریت با استفاده از سولفات مس نشان داد که یون‌های مس می‌توانند بازیابی پیریت را افزایش دهند [14-15]. در زمینه استفاده از سولفات مس در عملیات سولفورزدایی از کنسانتره‌های آهن، مطالعات اندکی انجام شده است. بدین منظور تأثیر اضافه کردن سولفات مس به منظور فعال‌سازی سطح پیریت و بهبود کیفیت کنسانتره در شرایط بهینه مذکور بررسی شد (شکل ۱۱). نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از سولفات مس تأثیری بر حذف سولفور در شرایط بهینه ندارد و حتی در نرخ‌های بالای سولفات مس، کارایی جدایش به واسطه از بین رفتن سطح کف کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده در تطابق با پژوهش انجام شده توسط آرویدسون و همکاران [۵] بود.



شکل ۱۱: تاثیر مصرف سولفات مس به عنوان فعال کننده بر عیار سولفور

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر متغیرهای عملیاتی بر میزان کاهش سولفور کنسانتره سنگ آهن و میزان اتلاف آهن در عملیات فلوتاسیون ستونی (معکوس) با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و تحلیل آماری نتایج بررسی شد. بدین منظور نمونه‌هایی از ورودی مدار فلوتاسیون خط فرآوری باطله‌های خشک مجتمع سنگ آهن گل‌گهر با عیار سولفور و آهن به ترتیب 0/48 و 63 درصد تهیه شد. برای تعیین شرایط بهینه، تأثیر شش عامل موثر بر فلوتاسیون یعنی میزان کلکتور، میزان کف‌ساز، ارتفاع کف، درصد جامد، نرخ هوای ورودی و pH در قالب 45 آزمایش و در پنج سطح بررسی و عوامل موثر معنادار بر پاسخ‌های کارایی فلوتاسیون تعیین شدند. پاسخ‌های فرآیند شامل جامد راه

2013. Flotation of pyrrhotite to produce magnetite concentrates with a sulphur level below 0.05% w/w, *Minerals Engineering*, 50–51, 4–12.

[6] Zhao, C., Yahui, Zh., Yongdan, C., 2012. Reverse flotation of quartz from magnetite ore with modified sodium oleate, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 34(5), 320-330.

[7] Shrimali, K., Miller, J.D., 2016. Polysaccharide depressants for the reverse flotation of iron ore. *Trans. Indian Inst. Met.*, 69(1), 83–95

[8] Filippov, L.O., Severov, V.V., Filippova, I.V., 2014. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation, *International Journal of Mineral Processing* 127, 62–69.

[9] Thanasekaran, H., Kohmuench, J., Christodoulou, L., 2013. Column flotation of iron ore - status and advances, *Iron Ore*, 1-14, Western Australia

[10] Viana, P.R.M., Silva, J.P., Rabelo, P.J.B., Coelho, A.G., and Silva, V.C., 1991. Column flotation for the expansion of the flotation circuit at samarco mineracao, *Column 91*, Int. Conf. on Column Flotation, Sudbury, June 2-6.

[11] Soltanmohammadi, V., Noaparast, M. Kohsari, A.H., Zamani, F., 2011. Influence of flotation parameters on decreasing sulfur and phosphorus contents in the Gol-E-Gohar iron ore concentrate, *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 46, 173-190,

[12] Soltanmohammadi, V., Noaparast, M. Kohsari, A.H., Zamani, F., 2009. Determination of optimum conditions to remove sulfur and phosphor from Gol-E-Gohar iron ore concentrate, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 33, B3, 267-278.

[13] Nakhaei, F. Irannajad, M. 2017. Sulphur removal of iron ore tailings by flotation, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38, 12, 1755–1763.

[14] Voigt, S., Szargan, R., Suoninen, E. 1994. Interaction of copper (II) ions with pyrite and its influence on ethyl xanthate adsorption. *Surf. and Interface Analysis*. 21 (8), 526-536.

[15] Agorhom, E. A., Skinner, W., Zanin, M. 2014, Diethylenetriamine depression of Cu-activated pyrite hydrophobised by xanthate, *Min. Eng.*, 57, 36–42

---

1- Dry tailing process