

## بهینه‌سازی شرایط فلوتاسیون در کارخانه فسفات اسفوردی

سید ضیاءالدین شفائی تنکابنی<sup>۱</sup>، محمد کارآموزیان<sup>۲</sup>، خداکرم غریبی<sup>۳</sup>  
فرامرز دولتی ارده‌جانی<sup>۴</sup>، رضا خالوکاکایی<sup>۵</sup>

۱- دانشگاه صنعتی شاهرود، kaveh\_shafaie@yahoo.com

۲، ۴ و ۵- دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشگاه یزد

(دریافت ۳۰ اردیبهشت ۱۳۸۵، پذیرش ۵ خرداد ۱۳۸۶)

### چکیده

مقاله حاضر حاصل مطالعات مرحله اول طرح بازیافت فسفات از نرمة در مجتمع فسفات اسفوردی می‌باشد. هدف این مرحله بهینه‌سازی فلوتاسیون فسفات برای بررسی امکان افزایش بازیابی از فسفات و جلوگیری از اتلاف آن بوده است. هدف از بهینه‌سازی عملیات فلوتاسیون کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی، دستیابی به حداکثر بازیابی فسفات همراه با حداقل بازیابی آهن در کنسانتره می‌باشد. پس از بررسی عوامل مختلف درگیر در فلوتاسیون فسفات، هشت پارامتر به عنوان عوامل مستقل اولیه شناسایی شدند. این عوامل عبارت بودند از: نسبت کلکتورهای مصرفی، مقدار کلکتورها، pH، مقدار نشاسته به عنوان بازدارنده، دانسیته پالپ، زمان آماده‌سازی برای نشاسته و برای کلکتورها و زمان کف‌گیری. در ابتدا ۲۷ آزمایش در قالب طراحی آماری آزمایش‌ها و آرایه متعامد  $L_{27}(3^{13})$  برای تعیین تغییرات پاسخ نسبت به تغییرات عوامل مذکور در سه سطح متفاوت انجام شد. تحلیل آماری پاسخ‌ها نشان داد که عوامل میزان مصرف نشاسته، دانسیته پالپ و مدت زمان کف‌گیری به ترتیب بیشترین تأثیر را بر فلوتاسیون فسفات دارند. با استفاده از تأثیر عوامل بارز و تحلیل واریانس آنها، شرایط عملیاتی مناسب برای دستیابی به مقادیر بیشینه برای بازیابی و عیار فسفات پیش‌بینی گردید. نتایج شرایط بهینه با نتایج دو آزمایش در شرایط رایج کارخانه در مقیاس آزمایشگاهی، مورد مقایسه قرار گرفت که نشان دهنده برتری نسبی شرایط بهینه در مقایسه با شرایط رایج کارخانه بوده است.

کلمات کلیدی: فسفات، اسفوردی، بهینه‌سازی، فلوتاسیون، طراحی آماری

## ۱- مقدمه

کانسار فسفات اسفوردی با منشا آذرین بوده و کانی‌های اصلی موجود در آن به شرح جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱: کانی‌های اصلی موجود در کانسنگ فسفات اسفوردی

کانی	فرمول شیمیایی
فلوئور آپاتیت	$Ca_5(PO_4)_3F$
هماتیت	$Fe_2O_3$
آپاتیت	$Ca_5(F,Cl)P_3O_{12}$
شاموزیت	$(Fe,Al,Mg)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
تالک	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
کوارتز	$SiO_2$
هندرسونیت	$Ca_2V_9O_{24}, 8H_2O$
سلنید زیرکونیوم	$ZrSe_3$

با توجه به ابعاد درجه آزادی کانی‌های حاوی فسفات، که معمولاً کوچکتر از ۱۵۰ میکرون می‌باشد، روش معمول در فرآوری این کانی‌ها فلوتاسیون است. فلوتاسیون آپاتیت‌ها در مجموعه فلوتاسیون نمک‌های با حلالیت کم قرار دارد. این نمک‌ها در محلول‌های آبی دارای حلالیت کمی بوده و تجزیه سطحی آنها در محیط‌های آبی، یون‌های مختلفی را بوجود می‌آورد که رفتار فیزیکو شیمیایی آنها را پیچیده و غیر انتخابی می‌کند. در دانسیته‌جذب، حالت سطحی هیدروفوبیک و بازایی فلوتاسیون به ترتیب از فلوئورآپاتیت به کربنات آپاتیت، هیدروکسیل آپاتیت و کلرو آپاتیت کاهش می‌یابد. در همه حالات ثابت شده است که اولئات‌ها، به عنوان بهترین کلکتور در شناورسازی آنها، در حضور تسریع کننده‌هایی نظیر آلکیل سوکسینامات‌ها و آلکیل سولفونات‌ها، در سطح آپاتیت با مکانیزم جذب شیمیایی جذب می‌شود و تشکیل اولئات کلسیم می‌دهد. از نظر مکانیزم عمل کلکتورها در فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی و سیلیکات‌ها، جذب اسیدهای چرب، از مجموعه کلکتورهای آنیونی، نمونه بارزی از جذب شیمیایی در سطح کانی و جذب آلکیل سولفونات‌ها، از مجموعه کلکتورهای آنیونی، و همچنین آمین‌ها که از کلکتورهای کاتیونی می‌باشند نمونه‌ای از جذب فیزیکی درایژن گروه از کانی‌ها می‌باشد [۱].

## ۱-۲- کارخانه فرآوری اسفوردی

در کارخانه کانه‌آرایی اسفوردی مواد معدنی پس از استخراج از معدن توسط کامیون به واحد سنگ‌شکنی حمل می‌شود. مواد حمل شده با ابعاد حداکثر ۶۰۰ میلی‌متر از طریق شبکه‌های گریزلی (۶۰×۶۰ سانتی‌متر) و گریزلی فیدر به سنگ‌شکن فکی با ظرفیت  $t/h$  ۱۴۰ و سپس در مدار سنگ‌شکنی بسته وارد

فلوتاسیون به عنوان یک فرآیند موثر در پرعیارسازی کانی‌های فلزی و صنعتی دارای اهمیت و جایگاه منحصر به فرد می‌باشد. عوامل متعددی بر فرآیند فلوتاسیون موثر می‌باشند که می‌توان آنها را در گروه‌های متفاوت دسته‌بندی کرد. گروه اول از عوامل به خواص فیزیکو شیمیایی کانی‌های مختلف موجود در کانسنگ مورد فراوری وابسته‌اند. گروه دوم از عوامل بستگی به شرایط فلوتاسیون و نحوه انتخاب روش مانند فلوتاسیون مستقیم، معکوس، تفریقی، تجمع‌ی و... دارند. گروه سوم از عوامل به خواص و مقدار مواد شیمیایی مختلف مورد استفاده برای فلوتاسیون انتخابی کانی مورد نظر، مانند کلکتورها، بازدارنده‌ها، تسریع کننده‌ها، تنظیم کننده‌ها و غیره وابسته می‌باشند و گروه چهارم از عوامل به سنتیک واکنش‌ها، زمان آماده‌سازی و... بستگی دارند.

با توجه به عوامل متعدد موثر بر فلوتاسیون، بهینه‌سازی فرآیند برای دستیابی به محصول هدف با مشخصات مورد نظر نیازمند انجام آزمایش‌های دقیق و تحلیل صحیح نتایج می‌باشد. طراحی آماری آزمایش‌ها ابزاری کارآمد در طرح آزمایش‌ها و تحلیل آماری نتایج آنها برای دستیابی به مدل ریاضی حاکم بر فرآیند با لحاظ کردن عوامل مستقل و همچنین اندرکنش‌های احتمالی موثر بر آن می‌باشد.

## ۱-۱- فلوتاسیون فسفات‌ها

فسفر یکی از مهم‌ترین عناصر حیاتی در زندگی بشر است که از کانی‌های صنعتی آپاتیت‌دار استخراج و فراوری می‌شود. کانی‌های آپاتیت‌دار در طبیعت با دو منشا رسوبی و آذرین یافت می‌شوند. قریب ۸۵٪ فسفات مورد نیاز صنایع در دنیا از ذخایر رسوبی و بقیه از ذخایر رسوبی تامین می‌شود. سنگ‌های رسوبی حاوی کانی‌های فسفات‌به دو گروه کانی‌های فسفریتی و فسفاتی تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین کانی‌های فسفات‌سنگ‌های رسوبی شامل کربناتو فلورآپاتیت، کلرو آپاتیت، هیدروکسی آپاتیت و فلورآپاتیت می‌باشند. فسفریت‌ها شامل پلتها و گوانو(حدود ۲٪ از منابع کشف شده دنیا) هستند. محدوده زمانی تشکیل کانسارهای فسفریتی کشف شده از میوسن تا پلیوسن است. ذخایر عظیم فلوریدا در آمریکا و همچنین ذخایر پرو از اینگونه ذخایر می‌باشند. کانسارهای فسفات آذرین غنی از آپاتیت به ویژه سنگ‌های آذرین آلکالن و کربناتیت است. عیار  $P_2O_5$  در این ذخایر بین ۵ تا ۳۰٪ است و در فلورآپاتیت‌های آن مقدار قابل توجهی عناصر کمیاب وجود دارد.

آزمایش‌ها و تحلیل‌های آماری مناسب نتایج کسب شده، دستیابی به بالاترین مقدار هدف امکان‌پذیر می‌شود. مرحله ابتدایی بهینه‌سازی سیستم‌های مهندسی، همچون عملیات فلوتاسیون در صنعت فرآوری مواد معدنی، شناخت مناسب از وضعیت سیستم می‌باشد. این شناسایی شامل تعیین هدف مناسب، انتخاب پارامترهای دخیل و موثر و شناسایی شرایط و محدودیت‌های بهینه‌سازی می‌باشند.

استفاده صحیح از روش‌های طراحی آزمایش آماری می‌تواند باعث سهولت در مراحل تولید، ارتقاء سطح قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد محصولات تولید شده گردد. این روش‌ها می‌توانند طراحی و توسعه محصول و فعالیت‌های مرتبط با حل مشکلات را به میزان قابل توجهی بهبود بخشند. در تعریف، طراحی آزمایش شامل یکسری آزمایش‌هایی می‌شود که بطور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند تغییراتی ایجاد می‌گردد تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود. روش‌های طراحی آزمایش‌ها را می‌توان در توسعه یا رفع مشکلات فرآیند و در نتیجه بهبود عملکرد آن و یا دست یافتن به فرآیندی که نسبت به منابع تغییرات خارجی فاقد حساسیت بوده و یا استوار<sup>۱</sup> است، استفاده کرد. به عبارت دیگر روش طراحی آزمایش‌ها، یکی از روش‌های مفیدی است که به وسیله آن می‌توان متغیرهای کلیدی که بر مشخصه کیفی مورد نظر فرآیند اثر می‌گذارند را شناسایی نمود. با بکارگیری این روش می‌توان عامل‌های ورودی قابل کنترل را به طور سیستماتیک تغییر داده و اثرات آنها را بر روی پارامترهای خروجی محصول ارزیابی کرد. آزمایش‌هایی که به طور آماری طراحی می‌شوند، می‌توانند میزان تغییرات در مشخصات کیفی را مورد بررسی قرار داده و سطوح متغیرهای قابل کنترل که باعث بهینه کردن عملکرد فرآیند می‌گردند را تعیین نمایند. از روش‌های مختلف طراحی آماری آزمایش‌ها روش پیشنهادی پرفسور تاگوچی، با استفاده از آرایه‌های متعامد<sup>۲</sup>، و بیتش، در طراحی فاکتوریل<sup>۳</sup>، طراحی با روش سطح پاسخ<sup>۴</sup> و نیز Mixture Design کاربردهای زیادی دارند. در این مقاله روش پیشنهادی تاگوچی با آرایه متعامد<sup>۳</sup> (L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>)) به عنوان آزمایش‌های غربال<sup>۵</sup> و نرم افزار Winrobust برای تحلیل آماری بکار گرفته شد و آزمایش‌های مستندسازی با استفاده از آزمایش‌های غربال برای بهینه‌سازی نیز انجام گردید [۲، ۸].

سنگ‌شکن مخروطی می‌شود. محصول سنگ‌شکن فکی (۱۷۵mm-۰) و محصول سنگ‌شکن مخروطی (۵۰mm-۰) توسط نوار نقاله به یک سرند دوپل منتقل می‌گردد. روی سرند با ابعاد ۲۲+ میلی‌متر جهت خردایش مجدد توسط نوار نقاله به سنگ‌شکن مخروطی هدایت می‌شود. بخش زیر سرند با ابعاد ۲۲-۰ میلی‌متر در انبار خوراک خط تغلیظ به ظرفیت ۴۰۰۰ مترمکعب انباشت می‌شود. خوراک توسط سه فیدر و نوار نقاله‌های واسطه با ظرفیت ۵۷/۵ t/h و عیار حدود ۱۶٪ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و d<sub>80</sub>=۱۴mm وارد آسیای میله‌ای شده و محصول آن به شکل پالپ با دانه‌بندی d<sub>80</sub>=600mic. با فشار ۰/۶ بار به یک هیدروسیکلون پمپ می‌شود. ته‌ریز سیکلون با دانه‌بندی d<sub>80</sub>=۷۵۰mic. توسط یک آسیای گلوله‌ای که با

هیدروسیکلون در مدار بسته‌قراردارد مجدداً تا ۱۰۰- میکرون خرد می‌شود. سرریز سیکلون با دانه‌بندی ۱۵۰- میکرون جهت نرمه‌گیری با فشار ۲/۴ بار به یک سیکلون خوشه‌ای پمپ می‌شود. سرریز سیکلون خوشه‌ای (نرمه) با ابعاد میکرون ۱۰- به بخش باطله هدایت و ته‌ریز سیکلون جهت فلوتاسیون به ترتیب وارد کاندیشنرهای ۱ و ۲ شده در کاندیشنر ۱ نشاسته جهت بازداشت آهن و NaOH برای تنظیم pH=۹-۱۰ و در کاندیشنر دوم کلکتورهای Flo YS20 به عنوان کلکتور اصلی از مشتقات اسیدهای چرب و Procol 4396 از گروه آلکیل سوکسینامات‌ها به عنوان تسریع کننده و انتخابی کننده فلوتاسیون کانی‌های فسفات (به نسبت ۹۰٪ و ۱۰٪) اضافه شده و سپس وارد سلول‌های رافر می‌شود. کنسانتره رافر بعد از دو بار شستشو به عنوان کنسانتره نهایی آگیری و فیلتر می‌شود. کنسانتره نهایی فسفات دارای عیار P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ۳۹٪، Fe ۰/۸٪، MgO ۰/۴٪، Cl ۰/۱۷٪ حدود ۹٪ رطوبت به میزان تقریبی ۱۶ t/h توسط نوار نقاله به انبار کنسانتره منتقل و سپس به فروش می‌رسد.

باطله رافر نیز به تیکنر خوراک خط تولید کنسانتره آهن منتقل می‌گردد. باطله بخش فلوتاسیون نیز بعد از یک مرحله جدایش مغناطیسی با شدت کم (برای جدایش منیتیت) و همچنین شدت متوسط (برای جدایش هماتیت) وارد سلول‌های فلوتاسیون جهت حذف فسفر می‌شود و به صورت کنسانتره آهن با عیار ۶۳٪ Fe و ۳۰٪ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> در می‌آید. در حال حاضر خط تولید کنسانتره آهن فعال نمی‌باشد.

### ۱-۳- بهینه‌سازی با استفاده از طراحی آزمایش‌ها

گام اول در بهینه‌سازی، شناسایی پارامترهای موثر در یک فرآیند است. با تغییر پارامترهای شناسایی شده در طرح

## ۲- شرح آزمایش‌ها و نتایج

## ۲-۱- انتخاب عوامل و سطوح

شرایط عملیاتی تعیین شده در طرح، عواملی بودند که تاثیر زیادی در بازیابی فلوتاسیون کانی‌های حاوی فسفات دارند. این عوامل عبارتند از: نسبت کلکتورهای مصرفی، مقدار کلکتورها، pH، مقدار نشاسته به عنوان بازدارنده، دانسیته پالپ، زمان آماده‌سازی برای نشاسته و برای کلکتورها و زمان کف‌گیری. امروزه تقریباً در تمام دنیا روش انجام آزمایش‌ها به صورت سنتی تغییر یک عامل در هر زمان و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها کاملاً منسوخ شده است. این امر به دلیل در نظر نگرفتن تاثیر متقابل و اندرکنش بین عوامل و زیاد شدن هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها به علت بالا رفتن تعداد آزمایش‌ها برای پوشش دادن کل ترکیبات ممکن عوامل می‌باشد. در این طرح نیز از روش طراحی آزمایش تاگوجی برای اجرای آزمایش‌ها استفاده شد. پس از شناسایی عوامل تأثیرگذار بر عملیات فلوتاسیون فسفات و بدست آوردن دامنه تغییرات عوامل، تصمیم گرفته شد که آزمایش‌های مورد نیاز برای کسب اطلاعات بیشتر از روند تغییرات پارامترهای درگیر در طرح، در سه سطح مختلف اجرا شوند. عوامل موثر به همراه مقادیر آزمایشی آنها در جدول ۲ آورده شده‌اند. در نتیجه طرح آزمایشی آرایه متعامد  $L_{27}(3^{13})$  تاگوجی که قابلیت بکارگیری

حداکثر ۱۳ عامل را در سه سطح با انجام ۲۷ آزمایش ممکن می‌سازد، به عنوان طرح آزمایشی مناسب انتخاب گردید. طرح انتخابی، ۸ عامل مستقل و دو عامل تاثیر متقابل یعنی نسبت کلکتورها و وزن آنها و نیز مقدار نشاسته و pH در نظر گرفته شدند. دو ستون باقیمانده نیز به تاثیر خطای بین آزمایش‌ها نسبت داده شد (جدول ۳).

## ۲-۲- اثر عوامل بر پاسخ

۲۷ آزمایش با شرایط مندرج در جدول ۳ در سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی دنور و مخزن ۳ لیتری انجام شد. همانطور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود سطوح عوامل مختلف مورد مطالعه در هر آزمایش نسبت به بقیه متفاوت بوده‌اند به طور مثال در آزمایش شماره ۱ تمام عوامل مورد مطالعه در سطح ۱ و در آزمایش ۲ سطوح عوامل A و B در سطح ۱ و عوامل C, D, E, F, G, H در سطح ۲ قرار داشتند. بعد از هر آزمایش نمونه‌های شناور و غوطه ور آنالیز و مقدار آهن و فسفر آنها اندازه‌گیری و بازیابی فلوتاسیون برای هر دو محاسبه گردید. در جدول ۴ نتایج آزمایشات نشان داده شده است.

جدول ۲: عوامل و سطوح مورد مطالعه طرح

سطوح			علامت	عوامل
۳	۲	۱		
۱۰	۱۲/۵	۱۵	A	نسبت کلکتور ۱ به ۲ (%)
۵۸۰	۶۳۰	۷۰۰	B	مجموع وزن دو کلکتور مصرفی (g/t)
۹	۹/۵	۱۰	C	pH
۳۷۰	۴۰۰	۴۴۰	D	نشاسته (بازدارنده کانیهای آهن) (g/t)
۵	۷	۹	E	زمان آماده‌سازی نشاسته (min)
۳	۵	۷	F	زمان آماده‌سازی کلکتورها (min)
۳	۴	۵	G	زمان کف‌گیری (min)
۱۸	۲۲	۲۶	H	دانسیته پالپ (w/w %)

جدول ۳: طرح آزمایشی مورد نظر با آرایه متعامد (3<sup>13</sup>) L<sub>27</sub>

Run	A	B	A*B	C	D	I	E	F	G	e	H	e
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۴	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۳	۳
۵	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۱	۱
۶	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۲	۲
۷	۱	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۲	۲
۸	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۳	۳
۹	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱
۱۰	۲	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲
۱۱	۲	۱	۲	۳	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
۱۲	۲	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱
۱۳	۲	۲	۳	۱	۱	۲	۳	۲	۳	۱	۳	۱
۱۴	۲	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۳	۱	۲	۱	۲
۱۵	۲	۲	۳	۱	۳	۱	۲	۱	۲	۳	۲	۳
۱۶	۲	۳	۱	۲	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۲	۳
۱۷	۲	۳	۱	۲	۲	۳	۱	۱	۲	۳	۳	۱
۱۸	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۲	۳	۱	۱	۲
۱۹	۳	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳
۲۰	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱
۲۱	۳	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲
۲۲	۳	۲	۱	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۳	۳	۲
۲۳	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۱	۳
۲۴	۳	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۲	۱
۲۵	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۲	۱
۲۶	۳	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۱	۳	۲	۳	۲
۲۷	۳	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۱	۳
L1*	۱۰	۵۸۰		۹	۳۷۰		۵	۳	۳		۸	
L2*	۱۲/۵	۶۳۰		۹/۵	۴۰۰		۷	۵	۴		۲۲	
L3*	۱۵	۷۰۰		۱۰	۴۴۰		۹	۷	۵		۲۶	

\* L1 و L2 و L3 مقادیر هریک از عوامل در سطوح اول، دوم و سوم است

بقیه فاکتورها با اطمینان بالا (مثلا ۰.۹۵) بر پاسخ فرآیند موثر باشد مشخص نمود اما می توان درجه اهمیت آنرا نسبت به بقیه پارامترها تعیین کرد. در حقیقت این روش با مبانی نظری مربوط به طراحی آماری آزمایشها سازگار بوده و به عنوان آزمایشهای غربال تلقی می شود.

جدولهای ۵ و ۶ آنالیز واریانس بازیابی فسفات و آهن در کنسانتره را نشان می دهد. شکل های ۱ تا ۴ نیز تاثیر عوامل و سطوح آنها را بر بازیابی فسفات و آهن در کنسانتره فسفات نشان می دهد.

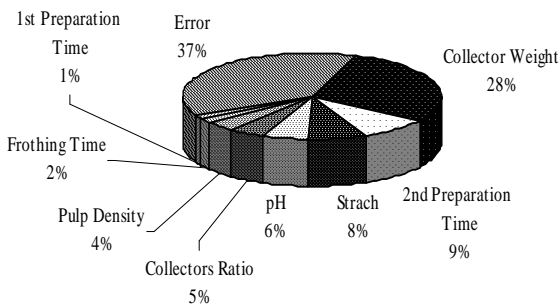
ملاحظه می شود برای هر آزمایش راندمان عیاری، وزنی و همچنین کارایی جدایش محاسبه شده است. تحلیل آماری از جمله تحلیل واریانس قادر به تعیین عوامل بارز در طرح می باشند. لازم است متذکر گردد از نظر آماری می توان به دو صورت نسبت به تعیین فاکتورهای موثر اقدام نمود. در روش اول با استفاده از آماره های مختلف مانند F<sub>0t</sub> و مقایسه آنها باجدول استاندارد، فاکتور موثر و سطح اطمینان مشخص می شود. در روش دوم ترتیب مقایسه ای این آماره ها مد نظر قرار میگیرد. در این صورت بزرگترین مقدار تا کوچکترین آنها نشان دهنده ترتیب اهمیت و بارز بودن آنها در پاسخ فرآیند است. در تحلیل حاضر عوامل بارز برای بازیابی فسفات به ترتیب اهمیت مشخص شده اند. دلیل این امر نیز این است که به دلیل پیچیدگی فرآیند فلوتاسیون و تاثیر پارامترها و اندر کنش های مختلف ( خصوصاً زمانی که تعداد زیادی از پارامترها همزمان در حال بررسی باشند) بعضاً نمی توان فاکتوری را که در حضور

جدول ۴: نتایج بازیابی عیاری، وزنی و کارایی جدایش آزمایش‌ها

شماره آزمایش	بار ورودی			پرعیار			باطله			بازیابی (عیاری) (%)		بازیابی (وزنی) (%)		کارایی جدایش (%)	
	وزن گرم	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Fe %	وزن گرم	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Fe %	وزن گرم	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Fe %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe
1	500	13.02	32.85	191.4	29.66	7.29	305.3	2.58	47.06	87.82	7.93	87.78	8.55	60.44	4.02
2	600	13.02	32.85	240.7	28.75	7.93	350.1	2.24	50.36	89.79	9.96	89.96	9.83	59.88	4.33
3	600	13.02	32.85	228.7	30.9	6.15	366.5	2.8	49.32	86.32	7.14	91.19	7.19	61.38	3.33
4	600	13.02	32.85	223.3	30.12	6.3	369.3	2.55	49.66	87.85	7.44	87.17	7.23	61.05	3.41
5	500	13.02	32.85	194.6	29.31	6.41	307.5	2.28	49.94	89.45	7.66	87.25	7.56	60.56	3.47
6	600	13.02	32.85	234.3	28.47	7.32	354.5	2.43	49.48	88.93	8.79	87.01	8.87	59.19	4.00
7	600	13.02	32.85	256.8	28.18	8.65	337.8	1.67	51.86	92.67	11.58	93.48	11.37	59.91	4.65
8	600	13.02	32.85	197.9	28.89	6.2	395.8	4.82	46.48	75.59	6.39	73.96	6.29	54.54	3.37
9	500	13.02	32.85	207.7	27.55	7.84	286	2.05	51.3	91.03	10.13	89.02	10.04	58.41	4.23
10	600	13.02	32.85	211.7	30.74	5.91	382	3.18	48.46	84.30	6.60	84.19	6.42	60.33	3.21
11	600	13.02	32.85	199.3	31.5	5.96	394.8	3.94	46.92	79.71	6.23	81.16	6.09	59.03	3.23
12	500	13.02	32.85	199.4	28.75	5.58	296.6	2.36	50.48	89.20	6.67	88.77	6.83	59.68	2.99
13	500	13.02	32.85	180.4	29.74	6.38	316.4	3.34	48.52	83.75	7.22	82.94	7.05	58.95	3.48
14	600	13.02	32.85	256.3	27.9	7.73	338.4	1.92	51.34	91.55	9.98	92.35	10.14	59.13	4.16
15	600	13.02	32.85	245.8	27.83	8.21	349.6	2.31	51.1	89.70	10.63	88.24	10.32	58.47	4.45
16	600	13.02	32.85	217	28.96	6.42	376.8	3.21	47.95	84.74	7.11	81.28	7.14	58.37	3.51
17	500	13.02	32.85	201.5	27.41	7.24	293.4	2.3	48.84	89.88	8.47	85.71	8.97	57.85	3.97
18	600	13.02	32.85	252	27.27	8.33	344.1	2.27	51.1	90.06	10.82	88.54	10.72	57.68	4.52
19	600	13.02	32.85	222.3	30.08	6.33	371.8	2.87	48.46	86.18	7.14	86.45	7.21	60.34	3.45
20	500	13.02	32.85	190.4	29.38	6.48	306.1	2.52	49.76	88.21	7.71	86.53	7.56	60.21	3.51
21	600	13.02	32.85	213.7	29.65	6.21	381.4	3.87	49.64	80.83	7.31	81.78	6.79	57.62	3.36
22	600	13.02	32.85	173.5	34.31	4.32	422.3	4.36	47.54	76.20	4.47	76.74	3.83	59.56	2.31
23	600	13.02	32.85	233	29.58	7.78	357	2.61	50.88	87.69	9.91	89.72	9.35	60.29	4.22
24	500	13.02	32.85	208.4	29.29	7.92	288.2	2.1	51.28	90.35	10.25	94.41	10.12	60.85	4.27
25	500	13.02	32.85	220.8	27.21	9.28	275.6	1.59	52.22	93.24	12.74	92.96	12.57	58.43	4.98
26	600	13.02	32.85	262.4	27.66	9.38	333.4	1.98	51.82	91.33	12.76	93.56	12.58	58.68	5.06
27	600	13.02	32.85	248.6	27.81	8.61	348.4	2.74	51.52	87.58	11.40	88.94	10.91	57.78	4.65

جدول ۵: آنالیز واریانس بازیابی فسفات

F	Mean sq.	d.o.f	SS	عامل
۱/۹۵	۴۰/۶۴	۲	۸۱/۲۸	مقدار نشاسته
۱/۸۸	۳۹/۳	۲	۷۸/۵۹	دانسیته پالپ
۱/۵۷	۳۲/۸۸	۲	۶۵/۷۵	زمان کفگیری
۰/۹۰	۱۸/۸۸	۲	۳۷/۷۵	زمان آماده‌سازی ۲
۰/۷۵	۱۵/۷۳	۲	۳۱/۴۷	وزن کلکتورها
۰/۶۲	۱۲/۸۸	۲	۲۵/۷۵	زمان آماده‌سازی ۱
۰/۴۰	۸/۴۴	۲	۱۶/۸۸	pH
۰/۰۹	۱/۹۶	۲	۳/۹۲	نسبت کلکتورها
	۲۰/۸۸	۱۰	۲۰۸/۷۸	خطا



شکل ۲: تاثیر عوامل بر بازیابی فلوتاسیون آهن

با توجه به شکل ۱، عوامل موثر بر بازیابی فسفات عبارتند از: مقدار نشاسته، دانسیته پالپ، زمان کفگیری، زمان آماده‌سازی دوم و وزن کلکتور.

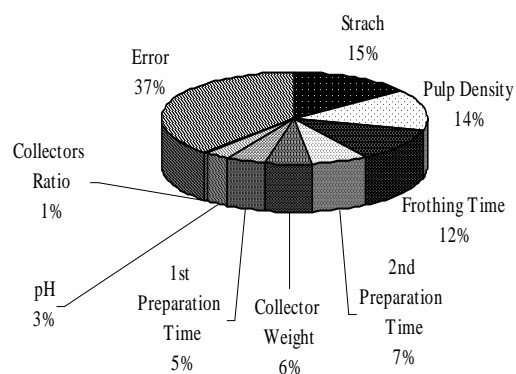
در شکل ۲ نیز تاثیر عوامل نسبت به بازیابی آهن نشان داده شده است. بر این اساس تاثیر وزن کلکتور، زمان آماده‌سازی دوم، مقدار نشاسته و pH تاثیر بیشتری نسبت به سایر عوامل دارند. می‌توان استنباط کرد که بخشی از تاثیر خطا در شکل‌های ۱ و ۲ مربوط به اندرکنش‌ها و نیز حضور نرمه در فلوتاسیون است. زیرا تجربه فلوتاسیون نمونه‌های حاوی و فاقد نرمه نشان داده است که بازیابی فسفات نمونه‌های حاوی نرمه حدود ۱۰٪ کمتر از موارد نظیر در نمونه‌های فاقد نرمه می‌باشد.

پس از شناسایی عوامل بارز، سطوح بهینه عوامل با رسم نمودارهای مقدار متوسط پاسخ‌های سطوح عوامل بدست آمدند. شکل‌های ۳ و ۴ تأثیرات سطوح عوامل را برای بازیابی فسفات آهن نشان می‌دهند.

در جدول ۷ سطوح عوامل برای حالت بهینه بازیابی و عیار فسفات و آهن در محصول پرعیار و باطله نشان داده شده است. به علت پیچیدگی فرآیند فلوتاسیون و تاثیر پارامترها و اندرکنش‌های مختلف که در فلوتاسیون اکسیدها و نمک‌های نیمه محلول بر پاسخ سیستم وجود دارد و همانطور که در شکل‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است، بین سطوح بهینه عوامل برای حداکثر بازیابی فسفات و حداقل بازیابی آهن در محصول شناور (پرعیار فسفات) هماهنگی وجود ندارد (مقایسه ستون‌های ۲ و ۳ در جدول ۷). به عبارت دیگر درشرایطی از سطوح تغییرات پارامترها که منجر به حداکثر بازیابی برای فسفات می‌شود، برای آهن نیز بیشترین بازیابی در محصول شناور حاصل می‌شود. با مقایسه عیار متوسط سطوح عوامل نیز این مشکل برای فسفات و آهن مشاهده شد. در حقیقت حالت

جدول ۶: آنالیز واریانس برای بازیابی آهن

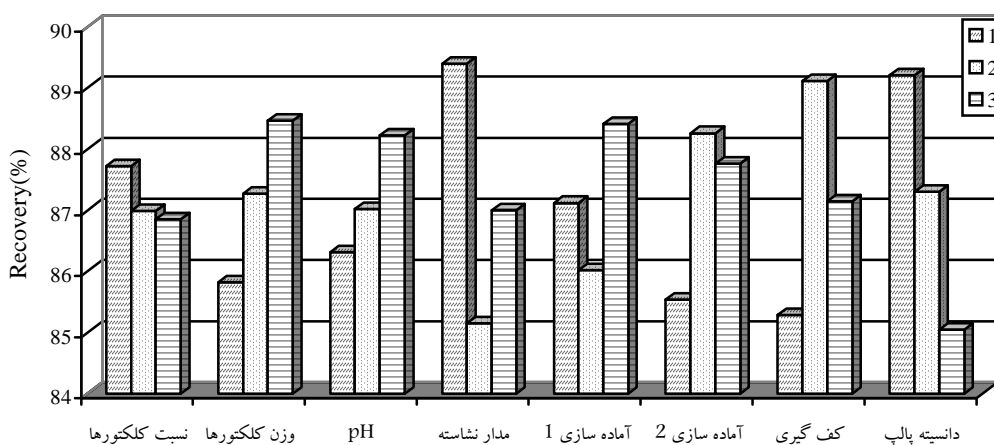
F	Mean sq	d.o.f	SS	پارامتر
۳/۸	۱۷/۲۳	۲	۳۴/۴۶	وزن کلکتورها
۱/۱	۵/۱	۲	۱۰/۱۹	زمان آماده‌سازی ۲
۱/۰	۴/۴۸	۲	۸/۹۷	مقدار نشاسته
۰/۷	۳/۳۸	۲	۶/۷۵	pH
۰/۶	۲/۸۶	۲	۵/۷۲	نسبت کلکتورها
۰/۵	۲/۲۲	۲	۴/۴۵	دانسیته پالپ
۰/۲	۰/۹۸	۲	۱/۹۶	زمان کفگیری
۰/۱	۰/۶۷	۲	۱/۳۵	زمان آماده‌سازی ۱
	۴/۵۶	10	۴۵/۵۷	خطا



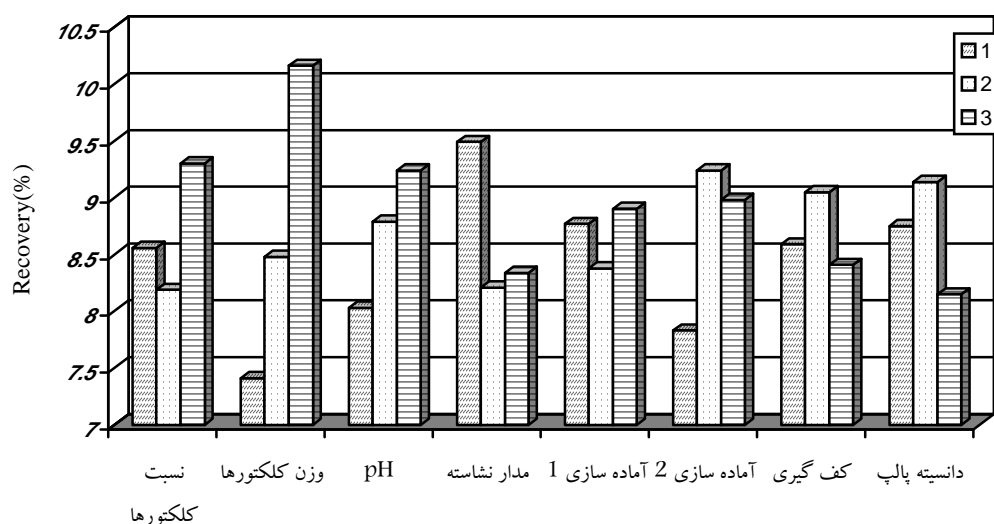
شکل ۱: تاثیر عوامل بر بازیابی فلوتاسیون فسفات

و عیار آهن هماهنگی لازم وجود دارد. در شرایط مشخصی می‌توان با تغییر فاکتورهای مربوطه میزان عیار آهن و بازیابی آنرا در محصول کنسانتره مینیمم کرد (مقایسه ستون‌های ۳ و ۵ در جدول ۷). با توجه به این نتایج تصمیم گرفته شد نسبت به تکرار شرایط آزمایشی که دارای مطلوبیت نسبی بیشتری می‌باشند اقدام و مشخصات کنسانتره حاصل با نتایج شرایط رایج در کارخانه مقایسه شود.

مطلوب برای این طراحی آزمایش‌ها رسیدن به شرایطی است که در آن میزان فسفات در کنسانتره بیشترین مقدار و در عین حال میزان بازیابی آهن کمترین مقدار باشد. چنین رفتار پیچیده‌ای قبلاً در بررسی شرایط بهینه فلوتاسیون هماتیت در مجتمع صنعتی و معدنی چادرمو نیز تجربه شده بود. در چنین شرایطی آزمایش‌های به عمل آمده به عنوان تست‌های غربال برای تعیین فاکتورهای مهم تلقی شده و آزمایش‌های تکمیلی و مستندسازی برای قطعی کردن و پیش‌بینی شرایط بهینه انجام می‌شود. نکته جالب این است که بین سطوح بهینه برای بازیابی



شکل ۳: تأثیر سطوح عوامل مربوط به بازیابی فسفات



شکل ۴: تأثیر سطوح عوامل مربوط به بازیابی آهن



جدول ۷: سطوح عوامل فلوتاسیون در حالت بهینه کنسانتره

ستون ۱	ستون ۲	ستون ۳	ستون ۴	ستون ۵	عوامل و پارامترها
نسبت کلکتورها	۱	۲	۳	۲	سطوح بهینه حداقل عیار آهن
وزن کلکتورها	۳	۱	۱	۱	سطوح بهینه حداکثر عیار فسفات
pH	۳	۱	۱	۱	سطوح بهینه حداقل بازبایی آهن
مقدار نشاسته	۱	۲	۳	۲	سطوح بهینه حداکثر بازبایی فسفات
زمان آماده سازی ۱	۳	۲	۲	۲	
زمان آماده سازی ۲	۲	۱	۱	۱	
زمان کف گیری	۲	۳	۳	۳	
دانسیته پالپ	۱	۳	۳	۳	
بازبایی فسفات	۹۸/۵	۷۷/۷۲	۷۹/۴۳	۷۷/۷۲	
بازبایی آهن	۱۲/۶۱	۳/۸۲	۵/۰۶	۳/۸۲	
عیار فسفات	۲۵/۴۷	۳۱/۹۶	۳۲/۷۵	۳۱/۹۶	
عیار آهن	۹/۱۸	۴/۴۶	۴/۹۹	۴/۴۶	

#### ۲-۴- مقایسه با شرایط کارخانه

با توجه به ارجحیت افزایش عیار فسفات نسبت به دیگر شاخص‌های محصول کنسانتره تولیدی، نتایج آزمایش در شرایط بهینه (با توجه به عیار فسفات) با شرایط عملیاتی کارخانه مقایسه گردید. جدول ۹ شرایط عملیاتی رایج کارخانه را نشان می‌دهد. دو آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی بر اساس شرایط رایج در کارخانه انجام شدند که نتایج آن در جدول ۱۰ ارائه شده است. در جدول ۱۱ مقایسه نتایج آزمایش ۲۴ و شرایط رایج نشان داده شده است.

#### ۲-۳- نتایج آزمایش‌ها در شرایط بهینه

برای تایید شرایط بهینه پیش‌بینی شده در جدول ۷ تعداد ۴ آزمایش به شرح جدول ۸ انجام گردید. در آزمایش شماره ۱ که

جدول ۸: نتایج آزمایش‌ها در شرایط پیش‌بینی شده بهینه و مقایسه آن با ارقام مورد انتظار

شماره آزمایش	هدف	عیار فسفات در کنسانتره	عیار آهن در کنسانتره	بازبایی کنسانتره	
				فسفات	آهن
۱	ماکزیمم بازبایی فسفات	۲۵/۴۷	۹/۱۸	۸۵/۳۵	۸/۰۸
				۹۸/۵	۱۲/۶۱
۲	حداقل بازبایی آهن	۳۱/۹۶	۳/۸۲	۷۵/۶۵	۳/۴۳
				۷۷/۷۲	۳/۸۲
۳	حداکثر عیار فسفات	۳۲/۷۵	۴/۹۹	۶۸/۹۷	۳/۲۸
				۷۹/۴۳	۵/۰۶
۴	حداقل عیار آهن	۳۱/۹۶	۳/۸۲	۶۰/۳۲	۲/۹۷
				۷۷/۷۲	۳/۸۲

توضیح: ارقام صورت نتیجه آزمایش و ارقام مخرج ارقام مورد انتظار از مدل می‌باشد.

جدول ۹: شرایط عملیاتی کارخانه فلوتاسیون

پارامتر	نسبت دو کلکتور	وزن کلکتور	pH	مقدار نشاسته	آماده سازی نشاسته	آماده سازی کلکتور	زمان کف گیری	درصد
مقدار	۱۳/۶	۶۲۵	۹	۴۰۰	۵	۲	۳	۲۲
واحد	%	گرم بر تن	-	گرم بر تن	دقیقه	دقیقه	دقیقه	%

جدول ۱۰: نتایج آزمایش‌های انجام شده بر اساس شرایط کارخانه

شماره آزمایش	بار ورودی			محصول پر عیار			باطله			بازیابی (عیاری)%		بازیابی (وزنی)%	
	وزن گرم	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Fe %	وزن گرم	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Fe %	وزن گرم	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Fe %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe
۱	۶۰۰	۱۳/۰۲	۳۲/۸۵	۲۳۲/۲	۳۰/۳۹	۷/۴۹	۳۶۲/۸	۲/۵۸	۵۰/۳۵	۸۷/۶۲	۹/۳۱	۹۱/۰۹	۸/۹۰
۲	۶۰۰	۱۳/۰۲	۳۲/۸۵	۲۳۳/۷	۲۹/۷۳	۷/۵۷	۳۶۴/۹	۲/۶۱	۵۰/۴۸	۸۷/۶۵	۹/۴۷	۸۹/۱۵	۹/۰۰

جدول ۱۱: شرایط مقایسه‌ای آزمایش ۲۴ و شرایط کارخانه

پارامتر	نسبت دو کلکتور	وزن کلکتور	pH	مقدار نشاسته	آماده سازی نشاسته	آماده سازی کلکتور	زمان کف‌گیری	دانشیه پالپ	فسفات بازیابی	عیار فسفات
واحد	%	گرم بر تن	-	گرم بر تن	دقیقه	دقیقه	دقیقه	%	%	%
کد	A	B	C	D	E	F	G	H	-	-
شرایط آزمایش بهینه	۱۰	۷۰۰	۱۰	۳۷۰	۹	۵	۴	۱۸	۸۵/۳۵	۳۲/۶۹
مقدار در کارخانه	۱۳/۶	۶۲۵	۹	۴۰۰	۵	۳	۳	۲۲	۸۷	۳۰

کنسانتره رافر از نظر عیار فسفات و مقدار آهن محتوی دارای شرایط بهتری خواهد بود.

### ۳- نتیجه گیری

بهینه‌سازی شرایط فلوتاسیون در کارخانه تولید کنسانتره فسفات اسفوردی با استفاده از روش طراحی آماری آزمایش‌ها و تحلیل آماری نتایج انجام و تغییر پاسخ آزمایش‌ها نسبت به تغییر عوامل قابل کنترل مورد مطالعه قرار گرفت. پاسخ‌های مورد ارزیابی عبارت بودند از بازیابی و عیار فسفات و بازیابی و عیار آهن در کنسانتره. برای تعیین شرایط بهینه، تاثیر ۸ عامل قابل کنترل موثر بر فلوتاسیون یعنی نسبت کلکتور مصرفی، مقدار کلکتور، pH، مقدار نشاسته، زمان

ملاحظه می‌شود در حالت بهینه با کاهش تقریباً ۱/۶۵٪ بازیابی فسفات، عیار فسفات کنسانتره ۲/۷٪ افزایش داشته است. این در حالی است که میزان آهن موجود در کنسانتره نیز حدود ۰/۵٪ کاهش نشان می‌دهد. مقایسه دو شرایط نشان می‌دهد که نسبت دو کلکتور مصرفی در حالت بهینه باید اندکی کاهش یافته و به ۱۰٪ برسد. افزایش pH به ۱۰ و افزایش زمان آماده‌سازی کلکتور از ۳ به ۵ دقیقه و افزایش زمان کف‌گیری به ۴ دقیقه و مهم‌تر از همه کاهش درصد جامد پالپ به ۱۸٪ از اقداماتی است که می‌تواند به بهینه‌سازی خط فلوتاسیون کمک کند.

لازم به تذکر این‌که در شرایط آزمایشگاهی فقط مرحله رافر مورد آزمون و مقایسه قرار گرفته و طبیعتاً محصول کلینر از

## منابع

- [1]. Lu et al. 1993, "Analysis of the Adsorption behavior of oleate on some synthetic apatite" Mineral Engineering, Pergamon press, Great Britian, Vol.6, No. 1, pp 79-86.
- [2]. Douglas C. Montgomery, 1991, "Design and Analysis of Experiments", John Willy & Sons.
- [3]. Genechi Taguchi, 1987, "System of Experimental Design", Vol.1, KRAUS International Publication.
- [4]. Alberto Garsia Dias, Don T. Philips, 1986, "Principles of Experimental Design and Analysis".
- [5]. Genechi Taguchi, 1987, "System of Experimental Design", Vol.2, KRAUS International Publication.
- [6]. Yeow Nam Ng, Don Black, Khanh Luu, 1995, "Taguchi methods", Curtin University Handout Notes for Computer Aided Engineering.
- [7]. G. Geoffery Vining, 1998, "Statistical Methods for Engineers", Duxbury Press.
- [8]. M.Dufour, C.Bazin, G.Labonte, 1993, "Application of Taguchi's Technique", Total Quality Research and Development, Quebec, Aug. 20 - Sep. 2, CIM.

آماده‌سازی اول، زمان آماده‌سازی دوم، زمان کف‌گیری و درصد جامد پالپ به طور همزمان در قالب آرایه متعامد ۲۷ آزمایشی و در سه سطح انجام و عوامل دارای تاثیر بیشتر بر فلوتاسیون فسفات و آهن در اسفوردی شناسایی شدند. در شرایط بهینه که بازیابی و عیار فسفات در کنسانتره ماکزیمم و بازیابی و عیار آهن مینیمم باشد مقدار نشاسته (به عنوان بازدارنده مورد مصرف)، زمان آماده‌سازی کلکتورها (به عنوان عامل هیدروفوب‌ساز و تعیین کننده سنتیک واکنش بین کلکتور و سطح کانه) و وزن کلکتورها بطور مشترک هم بر فلوتاسیون آهن و هم فسفات تاثیر بیشتری دارند. با توجه به پیچیدگی فلوتاسیون فسفات با ترکیب کانی‌های همراه و درجه فلوتاسیون انتخابی ضعیف آنها ملاحظه گردید که بیشترین بازیابی فسفات منجر به بازیابی بیشتر آهن در کنسانتره نیز می‌شود. در حقیقت شرایط بهینه برای ۴ پاسخ متفاوت می‌باشد. با توجه به این امر، شرایط بهینه برای هر یک از پاسخ‌ها به طور جداگانه تعیین گردید. ۴ حالت بهینه بسته به شرایط برای افزایش بازیابی فسفات، افزایش عیار فسفات و عیار و بازیابی آهن تعیین گردید. در حقیقت متناسب با شرایط می‌توان با تغییر شرایط بهینه مختلف، پاسخ مورد نظر را از خط تولید به دست آورد. نکته قابل تامل اینکه اینگونه پاسخ‌ها، که با توجه به مدل حاکم بر فرآیند تعیین می‌شوند، از محسّنات بکارگیری روش‌های طراحی آزمایش‌ها و تحلیل آماری نتایج می‌باشند. دستیابی به اینگونه نتایج با روش مرسوم و کلاسیک یک فاکتور در هر زمان، ناممکن است. شرایط بهینه در عیار کنسانتره با وضعیت رایج کارخانه نیز مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه نشان داد که در شرایط بهینه علیرغم کاهش ۱/۷٪ بازیابی فسفات، عیار آن به میزان ۲/۷٪ افزایش داشته و در عین حال عیار آهن به میزان ۰/۵٪ کاهش یافت.

## آخرنویس

## ۴- تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، مدیریت پژوهش و فناوری‌های نوین، مدیریت مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران-یزد که امکان انجام این طرح تحقیقاتی را فراهم نمودند و همچنین مدیریت محترم شرکت فسفات اسفوردی و پرسنل بخش تحقیقات، تولید و آزمایشگاه، که بدون مساعدت آنها انجام این طرح ممکن نبود، تشکر و قدردانی می‌شود.

- <sup>1</sup> - Robust
- <sup>2</sup> - Orthogonal array
- <sup>3</sup> - Factorial Design
- <sup>4</sup> - Response Surface
- <sup>5</sup> - Screening Tests