

مطالعه امکان پذیری افزایش راندمان جداکننده الکتریکی نیمه صنعتی برای فرآوری کانه تیتانیم کهنوج

نوشته: سید محمد جواد کلینی*، محمود عبداللهی* و مهدی نصرآبادی*

*گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

Feasibility Study on Electrical Separator Efficiency Increment for Kahnooj Titanium Mineral Processing Pilot Plant

By: S. M. J. Koleini*, M. Abdollahy*, M. Nasrabadi*

*Mineral Processing Dep., T.M.U. University, Tehran, Iran

تاریخ دریافت: ۱۳۸۴/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۵/۰۸/۰۶

چکیده

در این مقاله نتایج مطالعه افزایش راندمان (کارایی عملیاتی) جداکننده الکتریکی غلتکی واحد نیمه صنعتی تیتانیم کهنوج با بهینه سازی پارامترهای مؤثر بر کارایی عملیاتی ارائه شده است. در این راستا پس از انجام مطالعات در مورد جداکننده مذکور و پارامترهای مؤثر در کارایی عملیاتی جداکننده الکتریکی، پارامترهای قابل تغییر یعنی شدت ولتاژ کرونا، دمای مواد ورودی، دانه بندی مواد ورودی، سرعت غلتک ها، موقعیت الکترودهای کرونا و موقعیت تقسیم کن ها تنظیم و بهینه شد. برای این منظور، پارامترها دسته بندی و سپس طراحی آزمایشها با روش تاگوچی انجام شد. آزمایشهای مربوط به پارامترهای مذکور به استثنای دانه بندی مواد ورودی در مقیاس نیمه صنعتی صورت گرفت و آزمایشهای مربوط به دانه بندی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. مقادیر بهینه پارامترهای شدت ولتاژ کرونا، دمای مواد ورودی، سرعت غلتک ها به ترتیب ۲۲ کیلوولت، ۱۰۹ درجه سانتی گراد، ۱۵۴ دور در دقیقه و همچنین موقعیت الکترودهای کرونا ۱۰ سانتی متر و موقعیت تقسیم کن اول، دوم و سوم به ترتیب ۸، ۱۰ و ۱۰ سانتی متر به دست آمد. در این شرایط کارایی عملیاتی از مقدار ۳۵/۹٪ به ۴۶/۱٪ افزایش یافت. همچنین کارایی عملیاتی جداکننده الکتریکی در مقیاس آزمایشگاهی با d_{80} مواد ورودی ۲۵۹ میکرون، دارای بیشترین مقدار و برابر ۴۶/۰٪ حاصل شد.

کلید واژه‌ها: راندمان، کارایی جدایش، جداکننده الکتریکی، واحد نیمه صنعتی، تیتانیم، کهنوج

Abstract

In this paper, a study on efficiency increment (operation efficiency) of Kahnooj titanium pilot plant electrical roll separator with optimization of variable and effective parameters (crown voltage intensity, feed temperature and size distribution, rolls speed, crown electrodes position and splitter position) on operation efficiency is investigated and obtained results are presented. To achieve this aim, parameters were classified and then tests designed with Taguchi method. Feed size distribution tests in laboratory scale and the other tests in pilot plant scale were performed. Optimized values of crown intensity voltage, feed temperature, rolls speed was found to be 22 kv, 109, 154 rpm. However, the optimum position of crown electrodes, the first, second and third splitters were obtained to be 6, 8, 10 and 10 cm. In the position of optimum values, operation efficiency was increased from 35.9% to 46.1%. Moreover, operation efficiency in laboratory scale with d_{80} of 259 microns feed was maximized and operation efficiency of 46.0% obtained.

Keywords: Efficiency, Operation efficiency, Electrical Separator, Pilot Plant, Titanium, Kahnnooj

۱- مقدمه

تیتانیم فلز استراتژیک مهمی است که به طور گسترده در موتور و ساختمان داخلی هواپیماهای نظامی و غیر نظامی با کارایی‌های بالا، تجهیزات حمل و نقل، صنایع شیمیایی و واحدهای مولد برق از آن استفاده می‌شود. تنها حدود ۵٪ تولید سالانه جهانی تیتانیم صرف تولید فلز تیتانیم شده و ۹۵ درصد باقیمانده در تولید ماده سفید رنگ دی‌اکسید تیتانیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. دی‌اکسید تیتانیم به دلیل رنگ سفید، درجه دیرگدازی بالا و توان زیاد در توزیع و انتشار یکنواخت در ترکیب‌های دیگر، به عنوان عمده‌ترین ماده اولیه رنگ سفید در صنایع رنگ‌سازی، کاغذ، پلاستیک، لاستیک و مواد مختلف دیگر شناخته می‌شود.

کانی‌های حاوی تیتانیم عبارتند از روتیل، ایلمنیت و محصول دگرسان شده ایلمنیت یعنی لوکوکسن. روتیل دارای ۹۶-۹۳ درصد دی‌اکسید تیتانیم بوده، حال آن که این درصد در ایلمنیت به ۷۰-۴۴ درصد می‌رسد و در کنسانتره‌های لوکوکسن بالغ بر ۹۰ درصد می‌شود.

به منظور فرآوری کانه‌های تیتانیم بسته به ترکیب کانی‌ها از روش‌های مختلف فرآوری از جمله روش‌های گرانشی، مغناطیسی، الکتریکی و در برخی موارد فلوتاسیون استفاده می‌شود. با توجه به اینکه قسمت اعظم تولید سالانه جهانی فلز تیتانیم مربوط به ایلمنیت است و این کانی دارای خاصیت رسانایی می‌باشد، لذا جدایش این کانی از کانیهای همراه با استفاده از روشهای جدایش الکتریکی، از اهمیت ویژه‌ای در صنعت فرآوری تیتانیم برخوردار است (خدادادی و نصرآبادی، ۱۳۸۳).

جداکننده‌های الکتریکی با توجه به نوع باردار کردن (مالش، مباران الکترونی و القای هدایتی) مواد تقسیم می‌شوند (نعمت‌اللهی، ۱۳۸۴).

۲- عوامل مؤثر بر جدایش الکتریکی مواد

عوامل مؤثر بر جدایش الکتریکی مواد، به دو دسته عوامل دستگاهی و خواص مواد تقسیم می‌شوند. شناخت و ارزیابی هر کدام از این عوامل در جدایش مواد بسیار مؤثر است (Manouchehri et al., 2001).

۲-۱- عوامل دستگاهی

به طور کلی عوامل دستگاهی مؤثر در جدایش الکتریکی عبارتند از: **موقعیت الکترودها:** که به فاصله بین الکترود و غلتک یا فاصله بین الکترود و صفحه و زاویه قرارگیری الکترود نسبت به غلتک یا صفحه گفته می‌شود. این پارامتر در ایجاد فضای تخلیه کرونا بسیار تأثیرگذار است

(Manouchehri et al., 2001).

موقعیت صفحه‌های جداکننده: موقعیت صفحه‌های جداکننده در ماهیت پدیده‌های الکتریکی در فرایند تأثیرگذار نیست، اما برعیار و بازیابی محصولات تأثیرگذار است (Manouchehri et al., 2001).

ولتاژ الکترودها: نیروی الکتریکی که بر روی ذرات در تجهیزات جدایش سقوط آزاد عمل می‌کند، می‌تواند با تغییر ولتاژ الکترود اصلاح و تعدیل گردد. تحقیقات نشان داده است که در یک ولتاژ خاص جدایش الکتریکی به نحو مطلوبی صورت می‌پذیرد (Kelly & Spottiswood, 1989).

سرعت و اندازه غلتک‌ها: با توجه به نیروهای گریز از مرکز و دیگر نیروهای مربوط، میزان بهینه سرعت غلتک‌ها با کاهش قطر غلتک و اندازه ذرات افزایش می‌یابد. در بیشتر موارد سرعت غلتک‌ها بین ۸۰ تا ۲۰۰ دور در دقیقه می‌باشد (Manouchehri et al., 2001).

فشار اتمسفر: هنگامی که ذرات سقوط می‌کنند نیروی اصطکاک با تغییر فشار اتمسفر تغییر خواهد کرد و بنابراین تغییر فشار اتمسفر در تعادل بین نیروهای مؤثر در جدایش، و ایجاد جدایش مطلوب تأثیرگذار است (Manouchehri et al., 2001).

جنس و پوشش سطحی غلتک: در صورتی که سطح غلتک‌ها (در جداکننده‌های غلتکی) با یک لایه اکسیدی پوشیده شود، غلتک نیمه‌رسانا شده و بنابراین جدایش موادی که از نظر هدایت پذیری نسبتاً مشابه هستند را امکان پذیر می‌سازد (Manouchehri et al., 2001).

۲-۲- خواص مواد

مهم‌ترین پارامترهای مربوط به مواد ورودی که می‌تواند بر جدایش الکتریکی آنها تأثیرگذار باشد به شرح زیر است:

دما: تغییر در دمای مواد می‌تواند به تغییراتی در خواص فیزیکی مواد منجر گردد. با افزایش دما رسانایی رساناها کاهش می‌یابد، اما باعث افزایش رسانایی نیمه‌رساناها یا نارساناها می‌گردد (Manouchehri et al., 2001). با افزایش دما، یکی از ترکیبها در یک مخلوط نارسانا می‌تواند به اندازه کافی رسانا گردد و در نتیجه جدایش الکتریکی صورت پذیرد. تأثیر مهم‌تر دما زمانی رخ می‌دهد که تغییر فاز در دماهای بالا مشاهده شود (Manouchehri et al., 2001).

رطوبت: رطوبت نسبی روی آستانه ولتاژ مورد نیاز کرونا نیز تأثیر دارد. بدین صورت که افزایش رطوبت آستانه ولتاژ مورد نیاز را کاهش می‌دهد (Manouchehri et al., 2001).

خواص شیمیایی: خواص شیمیایی مواد ورودی معمولاً بیشتر از خواص

بندرعباس و ۳۳۵ کیلومتری کرمان (از طریق جیرفت) قرار دارد (شرکت مهندسين مشاور معدنکاو، ۱۳۶۸).

این کانسار شامل دو نوع ذخیره، یکی به صورت سنگی و دیگری به صورت آبرفتی است. طول و عرض میانگین کانسار آبرفتی به ترتیب حدود ۲ و ۱/۶ کیلومتر و ژرفای اکتشاف شده آن ۲ تا ۱۰ متر است. سطح کل کانسار ۳/۲ کیلومتر مربع و ذخیره آن بالغ بر ۴۳ میلیون تن با عیار ۳/۶٪ دی اکسید تیتانیم (TiO₂) و یا ۵/۳٪ ایلمنیت (FeTiO₃) است. ذخیره مربوط به سنگ مادر ۳۹۰ میلیون تن با عیار ۵/۸٪ دی اکسید تیتانیم (TiO₂) و یا ۸/۵٪ ایلمنیت (FeTiO₃) است (گروه مهندسين مشاور همکاری مشترک، ۱۳۷۴). کانی‌های موجود در کانسار تیتانیم کهنوج عمدتاً در سه خاصیت وزن مخصوص، مغناطیسی و الکتریکی متفاوت بوده و طراحی فلوشیت فراوری واحد نیمه صنعتی نیز بر اساس اختلاف بین این سه خاصیت بوده و به همین دلیل از سه روش جدایش گرانشی، مغناطیسی و الکتریکی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه کانی با ارزش در کانسار تیتانیم کهنوج ایلمنیت بوده و این کانی در خاصیت رسانایی الکتریکی با دیگر کانی‌های موجود در این کانسار متفاوت است، لذا می‌توان گفت که یکی از مهم‌ترین روشهای جداسازی مورد استفاده در این واحد، جداسازی الکتریکی است. در این راستا و در جهت تحقق جدایش الکتریکی دو دستگاه جداکننده الکتریکی صفحه‌ای و غلتکی در نظر گرفته شده است اما به دلیل مشکلات عملیاتی موجود، در حال حاضر، تنها از جداکننده الکتریکی غلتکی استفاده شده که در بخش پایانی تولید کنسانتره قرار دارد.

۴- آزمایش‌ها

۴-۱- روش کار

هدف از انجام آزمایش‌ها، بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر و قابل تغییر جداکننده الکتریکی غلتکی به منظور بهبود کارایی جدایش این جداکننده است. جدول ۱ عیار جریان‌های مختلف و شاخص‌های کارایی جداکننده الکتریکی را در شرایط طراحی (مقیاس آزمایشگاهی) و شرایط فعلی واحد نیمه صنعتی تیتانیم کهنوج نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، عیارهای جریان‌های مختلف و شاخصهای کارایی این جداکننده در شرایط فعلی، با شرایط طراحی اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد.

به منظور کاهش این اختلاف و بهینه‌سازی پارامترهای مذکور طراحی آزمایش‌ها صورت گرفت و نمونه‌گیری از سه نقطه خوراک، کنسانتره و باطله دستگاه انجام گرفت که این نقاط نمونه‌گیری به همراه نحوه حرکت مواد در داخل دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

فیزیکی در فرایند جدایش الکتریکی تأثیر گذار هستند. مهم‌ترین خاصیتی که در باردار کردن سطح کانی‌ها تأثیر گذار است، کارکرد سطحی (Surface Work Function) است که به تفاوت انرژی بین یک الکترون در سطح بیرونی و سطح داخلی ذره اطلاق می‌شود. رسانایی به تغییر خواص شیمیایی سطح به وسیله مواد شیمیایی، حساس بوده و افزودن مواد شیمیایی به سطح، باعث تغییر در رسانایی می‌شود. در واقع، خواص شیمیایی منجر به تغییر کارکرد سطحی کانی‌ها شده و در نتیجه انتخاب پذیری آنها را بهبود می‌بخشد (Manouchehri et al., 2001). امروزه جدایش الکتریکی کانی‌های پتاس از باطله همراه و جدایش کوارتز از ناخالصی‌های کلسیت و آپاتیت با افزودن مواد شیمیایی امکان‌پذیر می‌شود (Manouchehri et al., 2001; Pearse & Pope, 2001). **تمیزی سطح:** اگرچه لایه سطحی روی ذرات کانه به وسیله روش‌های عمل‌آوری شیمیایی ایجاد می‌شود، ولی برای تغییر رفتار الکتریکی دانه‌های کانی، در بعضی شرایط سطح کانی‌ها باید تمیز شود تا جدایش مطلوب حاصل شود. به عنوان مثال، ذرات کوچک‌تر از میکرون تمایل دارند به ذرات بزرگ‌تر به صورت یک لایه نازک بچسبند و در نتیجه هنگامی که عمل باردار کردن صورت می‌گیرد، این فرایند تحت تأثیر ویژگی‌های لایه گرد و غبار تشکیل شده روی ذرات درشت قرار می‌گیرد و عمل جدایش الکتریکی را دچار اختلال می‌کند. بنابراین تمیز کردن سطح ذرات پیش از باردار کردن، یک مرحله ضروری برای دستیابی به جدایش مطلوب و مورد نظر است (Kelly & Spottiswood, 1989).

نوع خردایش: در هر فرایند جدایش نقش خردایش حساس و انکارناپذیر است. کاهش ابعاد مواد، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از قبیل شکل، اندازه، سطح آزاد، ترکیب شیمیایی، شکل شبکه، انرژی آزاد سطحی و رسانایی را تغییر می‌دهد (Manouchehri et al., 2001).

ترکیب عنصری: همواره ناخالصی‌هایی در شبکه بلوری کانی‌ها وجود دارد که خواص فیزیکی آنها را تغییر می‌دهند. کارکرد الکتریکی به شدت به آرایش اتم‌ها در سطح بیرونی مواد وابسته است. بسته به موقعیت و نوع ناخالصی‌ها، کانی‌ها سطوح انرژی متفاوت و در نتیجه خواص الکتریکی متفاوت دارند (Manouchehri et al., 2001).

شکل و اندازه کانی‌ها: با توجه به این که در جدایش الکتریکی، تعادل بین نیروهای گرانشی، گریزاز مرکز، نیروی الکتریکی و نیروی اصطکاک، تعیین‌کننده مسیر حرکت ذرات می‌باشد و با توجه به وابستگی این نیروها به ابعاد ذره، می‌توان به اهمیت تأثیر شکل و اندازه کانی‌ها در جدایش الکتریکی پی‌برد (Tarjan, 1986).

۳- کانسار تیتانیم کهنوج

کانسار آبرفتی تیتانیم کهنوج در ۲۵ کیلومتری کهنوج، حدود ۱۷۰ کیلومتری

از میان عوامل مؤثر بر کارایی جدایش جداکننده مورد نظر، عوامل قابل تغییر که تأثیر آنها مورد بررسی قرار گرفت عبارتند از شدت ولتاژ، دمای مواد ورودی، دانه بندی مواد ورودی، سرعت غلتک، موقعیت الکترود کرونا و موقعیت تقسیم کن. شدت ولتاژ، سرعت غلتک، موقعیت الکترود کرونا و موقعیت تقسیم کن جزو پارامترهای دستگاهی و دما و دانه بندی مواد ورودی جزو پارامترهای مربوط به مواد ورودی است. به علت عدم امکان تغییر دانه بندی بار ورودی با توجه به حجم زیاد بار ورودی دستگاه، آزمایش های مربوط به این پارامتر نیز در مقیاس آزمایشگاهی صورت گرفت و تأثیر این عامل بر کارایی جدایش جداکننده الکتریکی به طور مستقل بررسی و تعیین شد.

۴-۲- تأثیر شدت ولتاژ و دمای مواد ورودی و سرعت غلتک اول

در این مرحله دیگر پارامترهای مورد بررسی ثابت بوده که مقادیر آن در جدول ۳ آورده شده است.

۴-۲-۱- مرحله غربال گری

در این قسمت برای حذف پارامترهای کم تأثیر و تعیین اثر متقابل پارامترهای مورد بررسی مرحله غربال گری با سه عامل و دو سطح صورت گرفت که در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین آرایه L_8 انتخابی تاگوچی در جدول ۵ آورده شده است. طراحی آزمایش مرحله غربال گری با آرایه L_8 صورت گرفت که شرایط آزمایش و نتایج حاصله در جدول ۶ نشان داده شده است.

برای حذف پارامترهایی که در عملکرد جداکننده الکتریکی کم تأثیر هستند واریانس و درصد تأثیر هر یک از پارامترها در کارایی جدایش با استفاده از نرم افزار Qualitek-4 تعیین شد که در جدول ۷ نشان داده شده است.

پس از حذف پارامترهای کم تأثیر پارامترهای تأثیرگذار در کارایی جدایش به نحوی است که در جدول ۸ نشان داده شده است.

همان طور که در جدول ۸ نشان داده شده است پیش بینی می شود در شرایطی که در جدول فوق برای پارامترها در نظر گرفته شده است جداکننده الکتریکی دارای کارایی عملیاتی ۴۲/۵۲٪ باشد.

تصاویر ۳ تا ۸ تأثیر پارامترهای مورد بررسی را در مرحله غربال گری نشان می دهد.

۴-۲-۲- مرحله بهینه سازی

مرحله بهینه سازی با آرایه متعامد L_9 انجام شد. جدول ۹ مقادیر سطوح سه گانه پارامترهای تأثیرگذار برای مرحله بهینه سازی را نشان می دهد. همچنین جدول ۱۰ طرح آرایه L_9 برای عامل های سه سطحی و نتایج آزمایش ها و جدول ۱۱ شرایط بهینه پارامترهای شدت ولتاژ، دما و سرعت غلتک اول و کارایی جدایی احتمالی را در این شرایط نشان می دهد.

پارامترهای مربوطه در چهار مرحله، بررسی و بهینه شدند. در انتخاب مراحل بهینه سازی سعی شد تا حد امکان، ترتیب این مراحل به گونه ای باشد که مراحل بعد کمترین تأثیر را در نتایج مراحل قبلی داشته باشند. این مراحل چهارگانه عبارتند از:

- مرحله اول شامل پارامترهای شدت ولتاژ، دمای مواد ورودی و سرعت غلتک اول.
- مرحله دوم (مرحله رافز) شامل پارامترهای سرعت غلتک اول، موقعیت الکترود اول و موقعیت تقسیم کن اول.

- مرحله سوم (مرحله رمق گیر اول) شامل پارامترهای سرعت غلتک دوم، موقعیت الکترود دوم و موقعیت تقسیم کن دوم.
- مرحله چهارم (مرحله رمق گیر دوم) شامل پارامترهای سرعت غلتک سوم، موقعیت الکترود سوم و موقعیت تقسیم کن سوم.

برای هر یک از مراحل فوق طراحی آزمایش ها با استفاده از نرم افزار Qualitek-4 صورت گرفت و تعداد آزمایش های مورد نیاز توسط این نرم افزار تعیین شد. بعد از بهینه سازی هر مرحله، پارامترهای مربوطه در حالت بهینه قرار گرفته و بهینه سازی مراحل بعدی انجام شد. لازم به ذکر است در طراحی آزمایشها از آرایه متعامد L_8 به منظور غربال کردن پارامترها و آرایه متعامد L_9 به منظور بهینه سازی پارامترها برای مرحله اول و دوم استفاده شد. اما به علت شباهت پارامترهای مرحله دوم، سوم و چهارم در مورد این مراحل تنها آرایه متعامد L_9 به منظور بهینه سازی پارامترهای مربوطه مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۲ نحوه اندازه گیری موقعیت الکترود و تقسیم کن که در مرحله دوم، سوم و چهارم مورد بررسی قرار می گیرند، نشان داده شده است. به منظور تهیه نمونه از نقاط نمونه گیری نشان داده شده در شکل ۱ هر نوبت ۵ مرتبه با فاصله زمانی ۵ ثانیه مدت ۳ ثانیه نمونه گیری در مسیر جریان مواد انجام و با مخلوط کردن آنها نمونه معرف تهیه شد.

پس از نمونه گیری ها و تهیه نمونه معرف، عیار نمونه ها توسط آزمایشگاه تعیین شده که عیار خوراک جداکننده الکتریکی حدود ۲۶/۵٪ و دانه بندی آن مطابق جدول ۲ به دست آمد. سپس تحلیل داده ها به وسیله رابطه کارایی عملیاتی (رابطه ۱) صورت گرفت.

$$E = R_c * R_t * 100 \quad (1)$$

E : کارایی عملیاتی (%)

$$R_c = \frac{c(f-t)}{f(c-t)}$$

R_c : بازیابی مواد با ارزش در کنسانتره

R_t : بازیابی مواد بی ارزش در باطله

$$R_t = \frac{(100-t)(c-f)}{(100-f)(c-t)}$$

f : عیار TiO_2 در خوراک

c : عیار TiO_2 در کنسانتره

t : عیار TiO_2 در باطله

محصول تغییر خواهد کرد و در واقع تنظیم موقعیت تقسیم کن برای دستیابی به محصول با کیفیت مورد نظر با حفظ کمیت آن است. لذا در این قسمت، دو عامل سرعت غلتک و موقعیت الکترود با موقعیت تقسیم کن اثرات متقابل نداشته و بنابراین تنها اثرات متقابل سرعت غلتک و موقعیت الکترود مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول ۱۳ مقادیر دو سطحی پارامترهای مرحله رافر را نشان می‌دهد. همچنین آرایه L_8 انتخابی تاگوچی در جدول ۱۴ آورده شده است. برای مرحله غربال‌گری طراحی آزمایش با آرایه L_8 صورت گرفت که شرایط آزمایش و نتایج حاصله در جدول ۱۵ نشان داده شده است.

برای حذف پارامترهایی که در عملکرد جداکننده الکتریکی کم‌تأثیر هستند واریانس و درصد تأثیر هر یک از پارامترها با استفاده از نرم‌افزار 4- Qualitek تعیین شد که در جدول ۱۶ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل تا این مرحله و با استفاده از نرم‌افزار 4- Qualitek شرایط بهینه پارامترها برای دستیابی به بیشترین کارایی عملیاتی جداکننده الکتریکی در سطوح مورد بررسی مشخص شد که در جدول ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۱۷ نشان داده شده است پیش‌بینی می‌شود در شرایطی که در جدول فوق برای پارامترها در نظر گرفته شده است جداکننده الکتریکی دارای کارایی عملیاتی ۴۵/۸۵٪ باشد.

۴-۳-۲- مرحله بهینه سازی

مرحله بهینه سازی با آرایه متعامد L_8 انجام شد. جدول ۱۸ مقادیر سطوح سه‌گانه پارامترهای تأثیرگذار برای مرحله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۱۹ طرح آرایه L_8 برای عامل‌های سه سطحی و نتایج آزمایش‌ها و جدول ۲۰ شرایط بهینه پارامترهای سرعت غلتک اول، موقعیت الکترود اول و تقسیم‌کن اول و کارایی عملیاتی احتمالی را در این شرایط نشان می‌دهد.

برای تأیید شرایط بهینه باید در این شرایط آزمایش صورت گیرد تأیید آن در صورتی خواهد بود که با توجه به سطح اعتماد ۹۵٪ در بازه $0.35 \pm 0.45/61$ قرار گیرد برای این منظور آزمایش در شرایط بهینه صورت گرفت که کارایی عملیاتی ۴۵/۳٪ محاسبه شد که در بازه مورد نظر قرار دارد. شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ به ترتیب تأثیر سرعت غلتک اول، موقعیت الکترود اول و موقعیت تقسیم‌کن اول را بر کارایی عملیاتی نشان می‌دهد. بیشترین میزان کارایی عملیاتی، همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است در سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه حاصل شده است. زیرا در سرعت غلتک پایین میزان نیروی گریز از مرکز کم بوده و بنابراین مقداری از ذرات کنسانتره وارد جریان باطله می‌شود و در سرعت غلتک بالا میزان این نیرو زیاد بوده و مقداری از ذرات باطله وارد جریان کنسانتره می‌گردد ولی در سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه میزان این نیرو بهینه بوده و به این دلیل، کارایی عملیاتی جداکننده در این سرعت غلتک بیشترین مقدار را دارد.

برای تأیید شرایط بهینه آزمایش صورت گرفت و کارایی جدایش با توجه به سطح اعتماد ۹۵٪ برابر ۴۳/۳٪ محاسبه شد که در بازه $0.66 \pm 0.43/83$ قرار گرفت. شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ تأثیر شدت ولتاژ، دمای مواد ورودی و سرعت غلتک اول را بر کارایی عملیاتی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود کارایی جدایش در شدت ولتاژ ۲۲ کیلوولت بیشترین مقدار خود را داراست. همچنین با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان تشخیص داد که از میان سه مقدار مورد بررسی برای پارامترهای دمای مواد ورودی و سرعت غلتک اول به ترتیب بیشترین مقدار کارایی عملیاتی در دمای ۱۰۹ درجه سانتی‌گراد و سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه حاصل شده است. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود بیشترین میزان کارایی عملیاتی در شدت ولتاژ ۲۲ کیلوولت حاصل شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، جدایش موادرسانا و نارسانا تحت تأثیر تعادل بین نیروهای الکتریکی، گرانشی، گریز از مرکز و در صورتی که ابعاد دانه‌ها ریز باشند، نیروی اصطکاک هوا انجام می‌گیرد. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان کرد که با تغییر شدت ولتاژ میزان نیروی الکتریکی تغییر می‌کند. در شدت ولتاژ ۲۰ کیلوولت میزان نیرو کم بوده و مقداری از ذرات کنسانتره که رسانا هستند، وارد جریان باطله می‌شوند و در شدت جریان ۲۴ کیلوولت این نیرو زیاد بوده و بنابراین مقداری از ذرات باطله وارد کنسانتره می‌شوند ولی در شدت ولتاژ ۲۲ کیلوولت نیروی الکتریکی بهینه بوده و به همین دلیل بیشترین میزان کارایی عملیاتی در این شدت ولتاژ حاصل شده است. با توجه به شکل ۱۰ بیشترین میزان کارایی عملیاتی در دمای ۱۰۹ درجه سانتی‌گراد حاصل شده است. زیرا با افزایش دمای مواد، رسانایی ذرات افزایش می‌یابد و جدایش مطلوب‌تر صورت می‌گیرد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، بیشترین میزان کارایی عملیاتی در سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه حاصل شده است زیرا در سرعت غلتک پایین، میزان نیروی گریز از مرکز کم بوده و بنابراین مقداری از ذرات کنسانتره وارد جریان باطله می‌شود و در سرعت غلتک بالا، میزان این نیرو زیاد بوده و مقداری از ذرات باطله وارد جریان کنسانتره می‌گردد ولی در سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه میزان این نیرو بهینه بوده و به این دلیل، کارایی عملیاتی جداکننده در این سرعت غلتک بیشترین مقدار را دارد.

۴-۳-۳- مرحله رافر (سرعت غلتک اول، موقعیت الکترود اول و تقسیم‌کن

اول)

در این مرحله سایر پارامترهای مورد بررسی ثابت بوده که در جدول ۱۲ مقادیر آن آورده شده است.

۴-۳-۱- مرحله غربال‌گری

در این مرحله، با توجه به اینکه با تغییر موقعیت تقسیم‌کن تنها عیار و بازیابی

کارایی عملیاتی کاهش می یابد زیرا با افزایش فاصله الکتروود از غلتک، ایجاد فضای تخلیه کرونا دچار اشکال می شود و به همین دلیل است که در موقعیت الکتروود ۱۰ سانتی متر بیشترین میزان کارایی عملیاتی حاصل شده است زیرا در این مقدار فضای تخلیه کرونا به نحو مطلوبی ایجاد می شود. با توجه به شکل ۲۱ می توان دید که بیشترین میزان کارایی عملیاتی در موقعیت تقسیم کن ۸ سانتی متر حاصل شده است زیرا در موقعیت تقسیم کن برابر با ۴ و ۶ سانتی متر مقداری از ذرات باطله وارد جریان کنسانتره می شود.

۴-۵- مرحله رمق گیر دوم (سرعت غلتک سوم، موقعیت الکتروود سوم و تقسیم کن سوم)

با توجه به شباهت این مرحله با مرحله رافر، غربال گری در مورد این مرحله انجام نشد و تنها مرحله بهینه سازی انجام شد. در این مرحله دیگر پارامترهای مورد بررسی ثابت بوده که در جدول ۲۵ مقادیر آن آورده شده است. مرحله بهینه سازی با آرایه متعامد L_0 انجام شد. جدول ۲۶ مقادیر سطوح سه گانه پارامترهای تأثیرگذار برای مرحله بهینه سازی را نشان می دهد. همچنین جدول ۲۷ طرح آرایه L_0 برای عامل های سه سطحی و نتایج آزمایشها و جدول ۲۸ شرایط بهینه پارامترهای سرعت غلتک دوم، موقعیت الکتروود دوم و تقسیم کن دوم و کارایی عملیاتی احتمالی را در این شرایط نشان می دهد. برای تأیید شرایط بهینه باید در این شرایط آزمایش صورت گیرد و نتیجه آن باید با توجه به سطح اعتماد ۹۵٪ در بازه $0.33 \pm 0.12 / 0.46$ قرار گیرد برای این منظور آزمایش در شرایط بهینه صورت گرفت که کارایی $0.46 / 1$ محاسبه شد که در بازه قرار دارد. شکلهای ۲۲، ۲۳ و ۲۴ به ترتیب تأثیر سرعت غلتک سوم، موقعیت الکتروود سوم و موقعیت تقسیم کن سوم را بر کارایی عملیاتی نشان می دهد. بیشترین میزان کارایی عملیاتی، همان طور که در شکل ۲۲ نشان داده شده است، در سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه حاصل شده است. زیرا در سرعت غلتک پایین میزان نیروی گریز از مرکز کم بوده و بنابراین مقداری از ذرات کنسانتره وارد جریان باطله می شود و در سرعت غلتک بالا میزان این نیرو زیاد بوده و مقداری از ذرات باطله وارد جریان کنسانتره می گردد. ولی در سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه میزان این نیرو بهینه بوده و به این دلیل کارایی عملیاتی جداکننده در این سرعت غلتک بیشترین مقدار را دارد.

همان طور که در شکل ۲۳ ملاحظه می شود، با افزایش موقعیت الکتروود کارایی عملیاتی کاهش می یابد، زیرا با افزایش فاصله الکتروود از غلتک، ایجاد فضای تخلیه کرونا دچار اشکال می شود و به همین دلیل است که در موقعیت الکتروود ۱۰ سانتی متر بیشترین میزان کارایی عملیاتی حاصل شده است زیرا در این مقدار فضای تخلیه کرونا به نحو مطلوبی ایجاد می شود. با توجه به شکل ۲۴ می توان دید که بیشترین میزان کارایی عملیاتی در موقعیت

کارایی عملیاتی جداکننده در این سرعت غلتک بیشترین مقدار را دارد. همان طور که در شکل ۱۷ ملاحظه می شود، با افزایش موقعیت الکتروود کارایی عملیاتی کاهش می یابد زیرا با افزایش فاصله الکتروود از غلتک، ایجاد فضای تخلیه کرونا دچار اشکال می شود و به همین دلیل است که در موقعیت الکتروود ۱۰ سانتی متر بیشترین میزان کارایی عملیاتی حاصل شده است زیرا در این مقدار فضای تخلیه کرونا به نحو مطلوبی ایجاد می شود. با توجه به شکل ۱۸ می توان دید که بهترین میزان کارایی عملیاتی در موقعیت تقسیم کن ۶ سانتی متر حاصل شده است زیرا در موقعیت تقسیم کن برابر با ۴ سانتی متر مقداری از ذرات باطله وارد جریان کنسانتره می شود و در موقعیت تقسیم کن برابر با ۸ سانتی متر مقداری از ذرات کنسانتره به جریان باطله وارد می شود که این تبادل در موقعیت تقسیم کن برابر با ۶ سانتی متر به حداقل می رسد.

۴-۴- مرحله رمق گیر اول (سرعت غلتک دوم، موقعیت الکتروود دوم و تقسیم کن دوم)

با توجه به شباهت این مرحله با مرحله رافر، غربال گری در مورد این مرحله انجام نشد و تنها مرحله بهینه سازی انجام شد. مرحله بهینه سازی با آرایه متعامد L_0 انجام شد. در این مرحله دیگر پارامترهای مورد بررسی ثابت بوده که در جدول ۲۱ مقادیر آن آورده شده است جدول ۲۲ مقادیر سطوح سه گانه پارامترهای تأثیرگذار برای مرحله بهینه سازی را نشان می دهد. همچنین جدول ۲۳ طرح آرایه L_0 برای عامل های سه سطحی و نتایج آزمایشها و جدول ۲۴ شرایط بهینه پارامترهای سرعت غلتک دوم، موقعیت الکتروود دوم و تقسیم کن دوم و کارایی عملیاتی احتمالی را در این شرایط نشان می دهد. برای تأیید شرایط بهینه باید در این شرایط آزمایش صورت گیرد و نتیجه آن باید با توجه به سطح اعتماد ۹۵٪ در بازه $0.15 \pm 0.01 / 0.46$ قرار گیرد. برای این منظور آزمایش در شرایط بهینه صورت گرفت و کارایی عملیاتی $0.45 / 9$ محاسبه شد که در بازه مورد نظر قرار دارد.

شکل های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ به ترتیب تأثیر سرعت غلتک دوم، موقعیت الکتروود دوم و موقعیت تقسیم کن دوم را بر کارایی عملیاتی نشان می دهد. بیشترین میزان کارایی عملیاتی، همان طور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است در سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه حاصل شده است. زیرا در سرعت غلتک پایین میزان نیروی گریز از مرکز کم بوده و بنابراین مقداری از ذرات کنسانتره وارد جریان باطله می شود و در سرعت غلتک بالا میزان این نیرو زیاد بوده و مقداری از ذرات باطله وارد جریان کنسانتره می گردد. ولی در سرعت غلتک ۱۵۴ دور در دقیقه میزان این نیرو بهینه بوده و به این دلیل کارایی عملیاتی جداکننده در این سرعت غلتک بیشترین مقدار را داراست. همان طور که در شکل ۲۰ ملاحظه می شود با افزایش موقعیت الکتروود

و به میزان ۱۵/۴٪ رسیده است.
۶- بیشترین میزان کارایی جدایش در d_{80} برابر با ۲۵۹ میکرون حاصل شد که با این دانه بندی میزان کارایی جدایش برابر با ۴۶/۱٪ به دست آمد.

۷- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از دانشگاه تربیت مدرس، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شرکت کان آذین و واحد نیمه صنعتی تیتانیم کهنوج به خاطر فراهم آوردن امکانات انجام این تحقیق تقدیر و تشکر می شود.

جدول ۱- عیار جریان های مختلف و شاخص های کارایی جداکننده الکتریکی در شرایط فعلی کارخانه و شرایط طراحی

شرایط طراحی	شرایط فعلی کارخانه	شرایط	بازرسی (ب)	شاخص های کارایی
۲۶/۹	۲۷/۱	خوراک		
۴۹/۶۶	۴۴/۷	کنسانتره		
۷/۲۱	۲۰/۵	باطله		
۸۵/۶۳	۴۵/۲	بازیابی کنسانتره (%)		
۶۸/۰۶	۷۹/۲	بازیابی باطله (%)		
۵۸/۲۸	۳۵/۹	کارایی عملیاتی (%)		
۱/۸۵	۱/۶۵	نسبت غنی سازی		
۴۶	۲۷/۴	راندمان وزنی (%)		

جدول ۲- دانه بندی خوراک جداکننده الکتریکی هنگام انجام آزمایش های بهینه سازی در واحد نیمه صنعتی

چشمه سرنده (میکرون)	وزن		وزن تجمعی (%)	
	gT	(%)	باقیمانده	عبور کرده
+۵۰۰	۲/۱	۰/۹	۰/۹	۹۹/۱
-۵۰۰+۳۰۰	۲۴/۳	۱۰/۲	۱۱/۱	۸۸/۹
-۳۰۰+۲۱۲	۵۹/۵	۲۵/۰	۳۷/۰	۶۳/۰
-۲۱۲+۱۵۰	۵۳/۳	۲۲/۴	۵۸/۴	۴۱/۶
-۱۵۰+۱۰۶	۴۲/۱	۱۷/۷	۷۶/۱	۲۳/۹
-۱۰۶+۷۵	۳۷/۱	۱۵/۶	۹۱/۷	۸/۳
-۷۵+۵۳	۱۴/۳	۶/۰	۹۷/۷	۲/۳
-۵۳+۳۸	۴/۸	۲/۰	۹۹/۸	۰/۲
-۳۸	۰/۵	۰/۲		
جمع	۲۳۸/۰	۱۰۰		
	۲۷۰			d_{80}

تقسیم کن ۱۰ سانتی متر حاصل شده است زیرا در موقعیت تقسیم کن برابر با ۶ و ۸ سانتی متر مقداری از ذرات باطله وارد جریان کنسانتره شده و در نتیجه باعث کاهش کارایی عملیاتی می شود.

۴-۶- تأثیر دانه بندی

نظر به اینکه تغییر دانه بندی با توجه به حجم زیاد بار ورودی جداکننده الکتریکی (۱ تن بر ساعت) عملی نبود، لذا تأثیر دانه بندی بر کارایی عملیاتی در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفت. بدین منظور پس از تهیه نمونه از خوراک دستگاه، آنالیز سرنده نمونه انجام شد و برای تهیه نمونه هایی با دانه بندی متفاوت بخش های مختلف دانه بندی نمونه اولیه با نسبت های مختلف با هم مخلوط شد. در جدول ۲۱ توزیع دانه بندی نمونه های خوراک با دانه بندی مختلف نشان داده شده است.

پس از تهیه نمونه ها با دانه بندی های مختلف، آزمایش های مورد نظر در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد و عیارسنجی خوراک، کنسانتره و باطله جداکننده الکتریکی آزمایشگاهی صورت گرفت و کارایی عملیاتی مربوط به هر دانه بندی محاسبه شد. جدول ۲۹ کارایی عملیاتی مربوط به هر نمونه را نشان می دهد. همچنین شکل ۲۵ روند تغییرات کارایی عملیاتی بر حسب d_{80} خوراک نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۲۵ ملاحظه می شود بیشترین میزان کارایی عملیاتی برابر ۴۶/۱٪ برای d_{80} برابر ۲۵۹ میکرون حاصل شد.

۵- نتایج

۱- مقادیر بهینه پارامترهای شدت ولتاژ کرونا، دمای مواد ورودی و سرعت غلتک ها به ترتیب ۲۲ کیلوولت، ۱۰۹ درجه سانتی گراد، ۱۵۴ دور در دقیقه، مقادیر بهینه موقعیت الکترودهای کرونا ۱۰ سانتی متر و مقادیر بهینه موقعیت تقسیم کن اول، دوم و سوم به ترتیب ۶، ۸ و ۱۰ سانتی متر حاصل شد.

۲- در شرایط بهینه این تحقیق، میزان بازیابی مواد با ارزش در کنسانتره جداکننده الکتریکی از ۴۵/۲٪ به ۶۲/۷٪ افزایش یافت ولی میزان بازیابی مواد بی ارزش در باطله از ۷۹/۲٪ به ۷۳/۵٪ کاهش یافته است.

۳- کارایی جدایش جداکننده الکتریکی که حاصل ضرب بازیابی مواد با ارزش در کنسانتره و بازیابی مواد بی ارزش در باطله است ۳۵/۹٪ به ۴۶/۱٪ در شرایط بهینه افزایش یافت.

۴- نسبت غنی سازی (C/f) نیز از میزان ۱/۶۵ به ۱/۷۴ و راندمان وزنی (C/F) دستگاه از میزان ۲۷/۴٪ به ۳۶/۱٪ افزایش یافت.

۵- با وجود اینکه عیار خوراک شرایط بهینه این تحقیق نسبت به شرایط قبل از تحقیق کمتر بوده است، عیار کنسانتره تحقیق ۴۵/۹٪ به دست آمد که به میزان ۱/۲٪ افزایش نشان می دهد. همچنین عیار باطله ۵/۱٪ کاهش نشان داده

جدول ۶- شرایط آزمایش با آرایه L_g مرحله غربالگری و نتایج حاصل

شماره آزمایش (%)E	عیار TiO ₂ (%)			RS (rpm)	TEMP (°C)	VI (KV)	
	t	c	f				
۳۷/۷	۱۹/۰	۳۹/۰	۲۶/۱	۱۳۲	۹۳	۲۲	۱
۳۹/۲	۱۸/۲	۳۹/۶	۲۶/۱	۱۵۴	۹۳	۲۲	۲
۳۸/۹	۱۸/۳	۳۹/۳	۲۶/۱	۱۳۲	۱۰۱	۲۲	۳
۴۲/۳	۱۶/۹	۴۲/۸	۲۶/۱	۱۵۴	۱۰۱	۲۲	۴
۲۹/۱	۲۲/۱	۳۸/۲	۲۶/۱	۱۳۲	۹۳	۲۶	۵
۳۴/۶	۲۰/۳	۳۸/۹	۲۶/۱	۱۵۴	۹۳	۲۶	۶
۳۲/۲	۲۱/۲	۳۸/۷	۲۶/۱	۱۳۲	۱۰۱	۲۶	۷
۳۶/۵	۱۹/۵	۳۹/۵	۲۶/۱	۱۵۴	۱۰۱	۲۶	۸

جدول ۳- مقادیر دیگر پارامترهای مورد بررسی

واحد	مقدار	پارامتر
cm	۱۲	موقعیت الکتروود اول
cm	۸	موقعیت تقسیم کن اول
rpm	۱۳۲	سرعت غلتک دوم
cm	۹	موقعیت الکتروود دوم
cm	۶	موقعیت تقسیم کن دوم
rpm	۱۳۲	سرعت غلتک سوم
cm	۱۲	موقعیت الکتروود سوم
cm	۶	موقعیت تقسیم کن سوم

جدول ۷- تجزیه و تحلیل آماری تأثیر پارامترهای مورد بررسی (ANOVA)

پارامترها	درجه آزادی (F)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	درصد تأثیر در کارائی جدایش
VI	۱	۸۲/۵۶	۸۲/۵۶	۶۵/۲۴
TEMP	۱	۱۰/۸۱	۱۰/۸۱	۷/۷۱
TEMP * VI	۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰
RS	۱	۲۷/۰۱	۲۷/۰۱	۲۱/۷۰
RS * VI	۱	۳/۰۰	۳/۰۰	۱/۴۵
RS * TEMP	۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰
سایر / خطا	۱	۱/۲۰	۰/۶۳	۴/۹۱
مجموع	۷	۱۲۴/۷۱		۱۰۰

جدول ۴- مقادیر دو سطحی پارامترهای مرحله اول

پارامترها	علامت اختصاری	سطح اول	سطح دوم
شدت ولتاژ (KV)	VI	۲۲	۲۶
دما (°C)	TEMP	۹۳	۱۰۱
سرعت غلتک اول (rpm)	RS	۱۳۲	۱۵۴

جدول ۸- شرایط بهینه پارامترهای شدت ولتاژ، دما و سرعت غلتک اول

پارامترها	سطح	مقدار سطح	سهم
شدت ولتاژ	۱	۲۲ (KV)	۳/۲۱
دما	۲	۱۰۱ (°C)	۱/۱۶
سرعت غلتک	۲	۱۵۴ (rpm)	۱/۸۳
کارائی عملیاتی احتمالی با شرایط بهینه: %۴۲/۵۲			

جدول ۵- آرایه L_g انتخابی ناگوجی

ردیف	VI	TEMP	VI*	RS	VI*	TEMP
۱	۲۲	۹۳	۱	۱۳۲	۱	۱
۲	۲۲	۹۳	۱	۱۵۴	۲	۲
۳	۲۲	۱۰۱	۲	۱۳۲	۱	۲
۴	۲۲	۱۰۱	۲	۱۵۴	۲	۱
۵	۲۶	۹۳	۲	۱۳۲	۱	۲
۶	۲۶	۹۳	۲	۱۵۴	۱	۲
۷	۲۶	۱۰۱	۱	۱۳۲	۲	۱
۸	۲۶	۱۰۱	۱	۱۵۴	۱	۱

جدول ۹- مقادیر سطوح سه گانه پارامترهای تأثیر گذار برای مرحله بهینه سازی

پارامترها	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
شدت ولتاژ (KV)	۲۰	۲۲	۲۴
دما (°C)	۹۱	۱۰۱	۱۰۹
سرعت غلتک اول (rpm)	۱۴۴	۱۵۴	۱۶۴

جدول ۱۰- طرح آرایه L₉ برای عامل های سه سطحی و نتایج آزمایش ها

E(%)	عیار TiO ₂ (%)			RS (rpm)	TEMP (°C)	VI (KV)	شماره آزمایش
	t	c	f				
۳۷/۵	۱۹/۶	۳۹/۶	۲۶/۸	۱۴۴	۹۱	۲۰	۱
۳۹/۴	۱۸/۵	۴۰/۱	۲۶/۸	۱۵۴	۱۰۱	۲۰	۲
۳۹/۲	۱۸/۶	۳۹/۷	۲۶/۸	۱۶۴	۱۰۹	۲۰	۳
۴۲/۸	۱۷/۰	۴۳/۲	۲۶/۸	۱۵۴	۹۱	۲۲	۴
۴۲/۱	۱۷/۴	۴۲/۹	۲۶/۸	۱۶۴	۱۰۱	۲۲	۵
۴۲/۵	۱۷/۲	۴۳/۱	۲۶/۸	۱۴۴	۱۰۹	۲۲	۶
۳۷/۴	۱۹/۷	۴۰/۱	۲۶/۸	۱۶۴	۹۱	۲۴	۷
۳۸/۶	۱۹/۱	۴۱/۶	۲۶/۸	۱۴۴	۱۰۱	۲۴	۸
۳۹/۹	۱۸/۴	۴۱/۲	۲۶/۸	۱۵۴	۱۰۹	۲۴	۹

جدول ۱۴- آرایه L₈ انتخابی تاگوچی

ردیف	RS	EP	RS*EP	SP
۱	۱۴۴	۱۰	۱	۴
۲	۱۴۴	۱۰	۲	۶
۳	۱۴۴	۱۲	۱	۴
۴	۱۴۴	۱۲	۲	۶
۵	۱۵۴	۱۰	۱	۴
۶	۱۵۴	۱۰	۲	۶
۷	۱۵۴	۱۲	۱	۴
۸	۱۵۴	۱۲	۲	۶

جدول ۱۵- شرایط آزمایش با آرایه L₈ مرحله غربال سازی و نتایج حاصل

E(%)	عیار TiO ₂ (%)			SP (cm)	EP (cm)	RS (rpm)	شماره آزمایش
	t	c	f				
۴۲/۰	۱۷/۴	۴۳/۸	۲۶/۵	۴	۱۰	۱۴۴	۱
۴۳/۹	۱۶/۵	۴۴/۸	۲۶/۵	۶	۱۰	۱۴۴	۲
۴۰/۶	۱۸/۱	۴۳/۱	۲۶/۵	۴	۱۲	۱۴۴	۳
۴۲/۴	۱۷/۳	۴۴/۵	۲۶/۵	۶	۱۲	۱۴۴	۴
۴۴/۲	۱۶/۴	۴۵/۱	۲۶/۵	۴	۱۰	۱۵۴	۵
۴۵/۸	۱۵/۵	۴۵/۵	۲۶/۵	۶	۱۰	۱۵۴	۶
۴۲/۷	۱۷/۱	۴۴/۱	۲۶/۵	۴	۱۲	۱۵۴	۷
۴۴/۳	۱۶/۳	۴۴/۹	۲۶/۵	۶	۱۲	۱۵۴	۸

جدول ۱۱- شرایط بهینه پارامترهای شدت ولتاژ، دما و سرعت غلتک اول

پارامترها	سطح	مقدار سطح	سهم
شدت ولتاژ	۲	۲۲ (KV)	۲/۵۳۳
دما	۳	۱۰۹ (°C)	۰/۵۹۹
سرعت غلتک اول	۲	۱۵۴(rpm)	۰/۷۶۶
کارایی عملیاتی احتمالی با شرایط بهینه: ۴۳/۸۳%			

جدول ۱۶- تحلیل آماری تأثیر پارامترهای مورد بررسی (ANOVA)

پارامترها	درجه آزادی (F)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	درصد تأثیر در کارایی جدایش
RS	۱	۸/۲	۸/۲	۴۴/۱۸
EP	۱	۴/۳۵	۴/۳۵	۲۳/۴۵
RS*EP	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰
SP	۱	۵/۹۵	۵/۹۵	۳۲/۰۵
سایر / خطا	۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۳۶
مجموع	۷	۱۸/۵۴		۱۰۰

جدول ۱۲- مقادیر دیگر پارامترهای مورد بررسی

پارامتر	مقدار	واحد
شدت ولتاژ	۲۲	KV
دمای مواد	۱۰۹	°C
سرعت غلتک دوم	۱۳۲	rpm
موقعیت الکترود دوم	۹	cm
موقعیت تقسیم کن دوم	۶	cm
سرعت غلتک سوم	۱۳۲	rpm
موقعیت الکترود سوم	۱۲	cm
موقعیت تقسیم کن سوم	۶	cm

جدول ۱۷- شرایط بهینه پارامترهای سرعت غلتک اول، موقعیت الکترود اول و موقعیت تقسیم کن اول

پارامترها	سطح	مقدار سطح	سهم
RS	۲	۱۵۴ rpm	۱/۰۱۲
EP	۱	۱۰ cm	۰/۷۳۷
SP	۲	۶ cm	۰/۸۶۲
کارایی عملیاتی احتمالی با شرایط بهینه: ۴۵/۸۵%			

جدول ۱۳- مقادیر دو سطحی پارامترهای مرحله رافر

پارامترها	علامت اختصاری	سطح اول	سطح دوم
سرعت غلتک اول (rpm)	RS	۱۴۴	۱۵۴
موقعیت الکترود اول (cm)	EP	۱۰	۱۲
موقعیت تقسیم کن اول (cm)	SP	۴	۶



جدول ۲۲- مقادیر سطوح سه گانه پارامترهای تأثیر گذار مرحله بهینه سازی

سطح سوم	سطح دوم	سطح اول	پارامترها
۱۶۴	۱۵۴	۱۴۴	سرعت غلتک دوم (rpm)
۱۴	۱۲	۱۰	موقعیت الکترود دوم (cm)
۸	۶	۴	موقعیت تقسیم کن دوم (cm)
۸	۶	۴	موقعیت تقسیم کن دوم (cm)

جدول ۱۸- مقادیر سطوح سه گانه پارامترهای تأثیر گذار برای مرحله بهینه سازی

سطح سوم	سطح دوم	سطح اول	پارامترها
۱۶۴	۱۵۴	۱۴۴	سرعت غلتک اول (rpm)
۱۴	۱۲	۱۰	موقعیت الکترود اول (cm)
۸	۶	۴	موقعیت تقسیم کن اول (cm)

جدول ۲۳- طرح آرایه L_8 برای عامل های سه سطحی و نتایج آزمایش ها

E(%)	عیار TiO_2 (%)			SP (cm)	EP (cm)	RS (rpm)	شماره آزمایش
	t	c	f				
۴۵/۳	۱۵/۸	۴۵/۶	۲۶/۴	۴	۱۰	۱۴۴	۱
۴۵/۲	۱۵/۷	۴۵/۱	۲۶/۴	۶	۱۲	۱۴۴	۲
۴۴/۹	۱۶/۰	۴۵/۳	۲۶/۴	۸	۱۴	۱۴۴	۳
۴۵/۹	۱۵/۵	۴۵/۶	۲۶/۴	۶	۱۰	۱۵۴	۴
۴۶/۰	۱۵/۴	۴۵/۸	۲۶/۴	۸	۱۲	۱۵۴	۵
۴۵/۵	۱۵/۷	۴۵/۶	۲۶/۴	۴	۱۴	۱۵۴	۶
۴۵/۴	۱۵/۷	۴۵/۵	۲۶/۴	۸	۱۰	۱۶۴	۷
۴۵/۲	۱۵/۷	۴۴/۸	۲۶/۴	۴	۱۲	۱۶۴	۸
۴۵/۰	۱۵/۸	۴۴/۶	۲۶/۴	۶	۱۴	۱۶۴	۹

جدول ۱۹- طرح آرایه L_8 برای عامل های سه سطحی و نتایج آزمایش ها

E(%)	عیار TiO_2 (%)			SP (cm)	EP (cm)	RS (rpm)	شماره آزمایش
	t	c	f				
۴۲/۱	۱۷/۵	۴۴/۱	۲۶/۷	۴	۱۰	۱۴۴	۱
۴۲/۳	۱۷/۴	۴۴/۶	۲۶/۷	۶	۱۲	۱۴۴	۲
۴۰/۵	۱۸/۳	۴۳/۵	۲۶/۷	۸	۱۴	۱۴۴	۳
۴۵/۷	۱۵/۷	۴۵/۷	۲۶/۷	۶	۱۰	۱۵۴	۴
۴۳/۸	۱۶/۶	۴۴/۶	۲۶/۷	۸	۱۲	۱۵۴	۵
۴۳/۶	۱۶/۶	۴۴/۰	۲۶/۷	۴	۱۴	۱۵۴	۶
۴۱/۹	۱۷/۶	۴۳/۸	۲۶/۷	۸	۱۰	۱۶۴	۷
۴۱/۷	۱۷/۵	۴۲/۷	۲۶/۷	۴	۱۲	۱۶۴	۸
۴۱/۳	۱۷/۸	۴۳/۱	۲۶/۷	۶	۱۴	۱۶۴	۹

جدول ۲۴- شرایط بهینه پارامترهای سرعت غلتک دوم، موقعیت الکترود دوم و موقعیت تقسیم کن دوم

سهم	مقدار سطح	سطح	پارامترها
۰/۴۲	rpm ۱۵۴	۲	سرعت غلتک دوم
۰/۱۵	cm ۱۰	۱	موقعیت الکترود دوم
۰/۰۵	cm ۸	۳	موقعیت تقسیم کن دوم
کارایی عملیاتی احتمالی با شرایط بهینه: ۴۶/۰۱%			

جدول ۲۰- شرایط بهینه پارامترهای سرعت غلتک اول، موقعیت الکترود اول و موقعیت تقسیم کن اول

سهم	مقدار سطح	سطح	پارامترها
۱/۸۲۲	rpm ۱۵۴	۲	سرعت غلتک اول
۰/۶۸۸	cm ۱۰	۱	موقعیت الکترود اول
۰/۵۵۵	cm ۶	۲	موقعیت تقسیم کن اول
کارایی عملیاتی احتمالی با شرایط بهینه: ۴۵/۶۱%			

جدول ۲۵- مقادیر دیگر پارامترهای مورد بررسی

واحد	مقدار	پارامتر
KV	۲۲	شدت ولتاژ
$^{\circ}C$	۱۰۹	دمای مواد
rpm	۱۵۴	سرعت غلتک اول
cm	۱۰	موقعیت الکترود اول
cm	۶	موقعیت تقسیم کن اول
rpm	۱۵۴	سرعت غلتک دوم
cm	۱۰	موقعیت الکترود دوم
cm	۸	موقعیت تقسیم کن دوم

جدول ۲۱- مقادیر دیگر پارامترهای مورد بررسی

واحد	مقدار	پارامتر
KV	۲۲	شدت ولتاژ
$^{\circ}C$	۱۰۹	دمای مواد
rpm	۱۵۴	سرعت غلتک اول
cm	۱۰	موقعیت الکترود اول
cm	۶	موقعیت تقسیم کن اول
rpm	۱۳۲	سرعت غلتک سوم
cm	۱۲	موقعیت الکترود سوم
cm	۶	موقعیت تقسیم کن سوم

جدول ۳۰- دانه بندی و کارایی عملیاتی مربوط

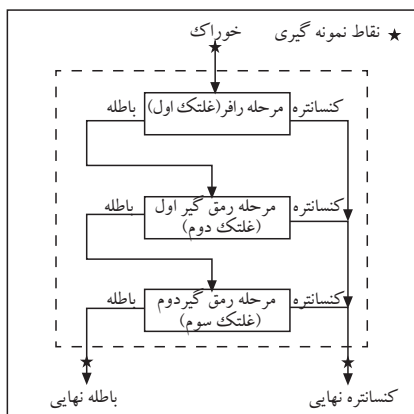
کارایی عملیاتی (%)	d_{80} خوراک (میکرون)
۴۳/۰	۱۵۴
۴۳/۶	۲۰۲
۴۶/۰	۲۵۹
۴۴/۲	۳۰۶
۴۱/۱	۳۵۳

جدول ۲۶- مقادیر سطوح سه گانه پارامترهای تأثیر گذار مرحله بهینه سازی

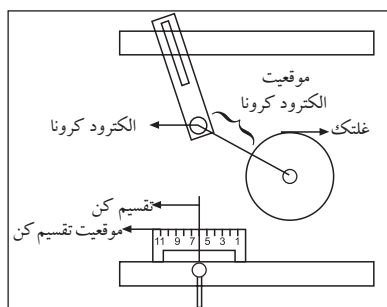
پارامترها	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
سرعت غلتک سوم (rpm)	۱۴۴	۱۵۴	۱۶۴
موقعیت الکترود سوم (cm)	۱۰	۱۲	۱۴
موقعیت تقسیم کن سوم (cm)	۶	۸	۱۰

جدول ۲۷- طرح آرایه L_9 برای عامل های سه سطحی و نتایج آزمایش ها

شماره آزمایش	RS (rpm)	EP (cm)	SP (cm)	عیار TiO_2 (%)		
				t	c	f
۱	۱۴۴	۱۰	۶	۱۵/۸	۴۵/۵	۲۶/۶
۲	۱۴۴	۱۲	۸	۱۵/۹	۴۵/۳	۲۶/۶
۳	۱۴۴	۱۴	۱۰	۱۶/۰	۴۵/۳	۲۶/۶
۴	۱۵۴	۱۰	۸	۱۵/۵	۴۵/۶	۲۶/۶
۵	۱۵۴	۱۲	۱۰	۱۵/۴	۴۵/۸	۲۶/۶
۶	۱۵۴	۱۴	۶	۱۶/۰	۴۵/۷	۲۶/۶
۷	۱۶۴	۱۰	۱۰	۱۵/۷	۴۵/۲	۲۶/۶
۸	۱۶۴	۱۲	۶	۱۵/۹	۴۵/۰	۲۶/۶
۹	۱۶۴	۱۴	۸	۱۶/۰	۴۴/۹	۲۶/۶

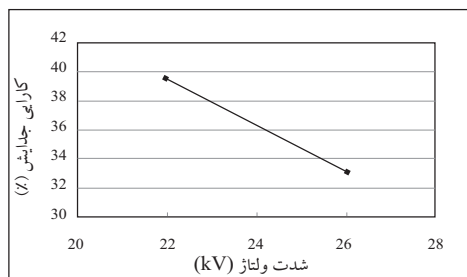


شکل ۱- نحوه حرکت مواد در جداکننده الکتریکی و نقاط نمونه گیری



شکل ۲- نحوه اندازه گیری فاصله الکترود کرونا تا غلتک

(موقعیت الکترود کرونا) و موقعیت تقسیم کن



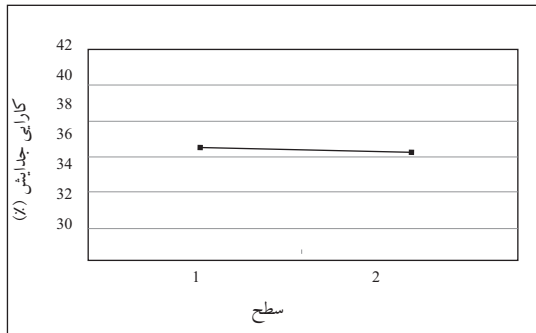
شکل ۳- تأثیر شدت ولتاژ در کارایی عملیاتی

جدول ۲۸- شرایط بهینه پارامترهای سرعت غلتک سوم، موقعیت الکترود سوم و موقعیت تقسیم کن سوم

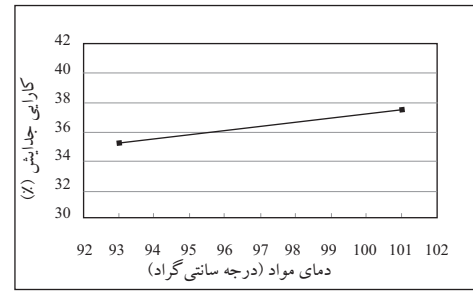
پارامترها	سطح	مقدار سطح	سهم
سرعت غلتک سوم	۲	۱۵۴	۰/۳۸
موقعیت الکترود سوم	۱	۱۰	۰/۲۴
موقعیت تقسیم کن سوم	۳	۱۰	۰/۱۴
کارایی عملیاتی احتمالی با شرایط بهینه: ۴۶/۱۲%			

جدول ۲۹- توزیع دانه بندی نمونه های خوراک با دانه بندی مختلف

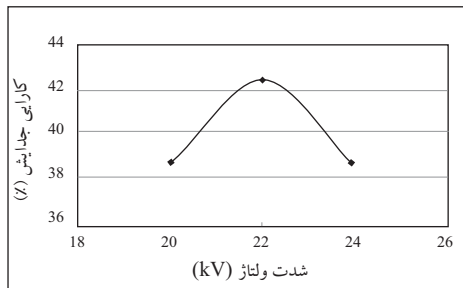
ابعاد (میکرون)	درصد تجمعی مواد عبور کرده				
۵۰۰	۹۹/۶	۹۸/۰	۹۶/۹	۹۶/۲	۹۴/۰
۳۰۰	۹۸/۲	۹۰/۹	۸۵/۷	۷۹/۵	۷۵/۰
۲۱۲	۸۸/۶	۸۲/۵	۷۳/۶	۶۹/۴	۵۹/۷
۱۵۰	۷۹/۴	۶۷/۸	۵۹/۵	۵۰/۰	۴۹/۱
۱۰۶	۲۷/۹	۲۴/۱	۲۲/۷	۲۰/۹	۲۰/۸
۷۵	۱۴/۳	۱۴/۷	۱۲/۶	۱۱/۶	۱۱/۳
۵۳	۶/۸	۸/۱	۶/۲	۴/۷	۵/۸
۳۸	۰/۹	۲/۷	۱/۶	۱/۴	۱/۷
d_{80}	۱۵۴	۲۰۲	۲۵۹	۳۰۶	۳۵۳



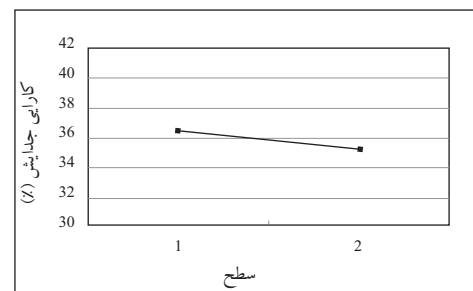
شکل ۸- اثر متقابل دما و سرعت غلتک اول در کارایی عملیاتی



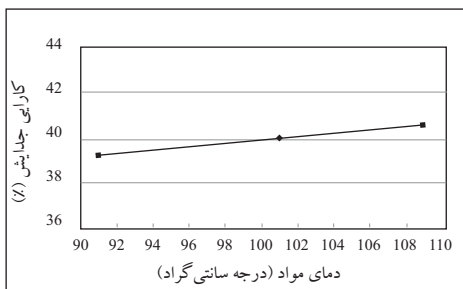
شکل ۴- تأثیر دمای مواد ورودی در کارایی عملیاتی



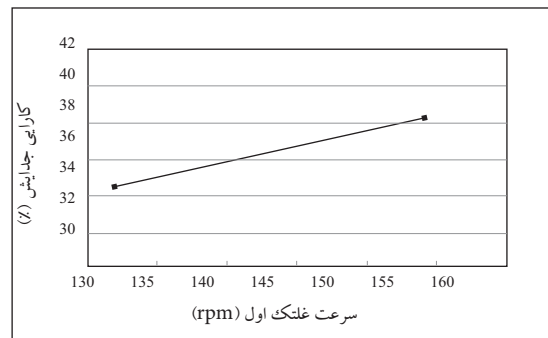
شکل ۹- تأثیر شدت ولتاژ در کارایی عملیاتی



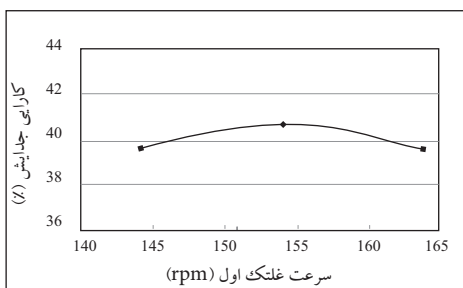
شکل ۵- اثر متقابل شدت ولتاژ و دمای مواد ورودی در کارایی عملیاتی



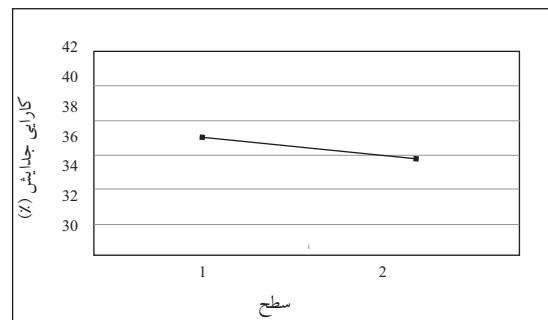
شکل ۱۰- تأثیر دمای مواد ورودی در کارایی عملیاتی



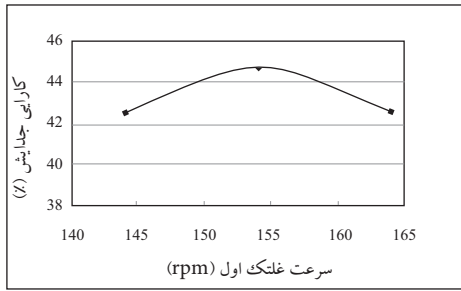
شکل ۶- تأثیر سرعت غلتک اول در کارایی عملیاتی



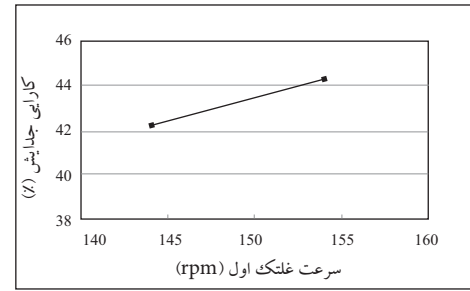
شکل ۱۱- تأثیر سرعت غلتک اول در کارایی عملیاتی



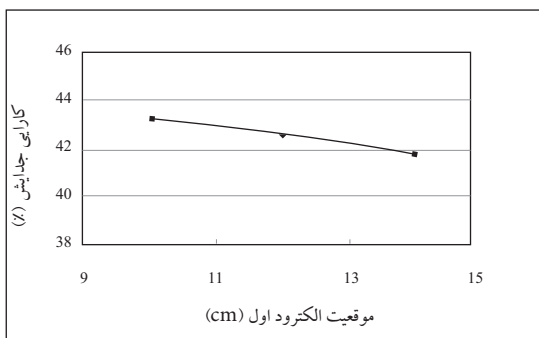
شکل ۷- اثر متقابل شدت ولتاژ و سرعت غلتک اول در کارایی عملیاتی



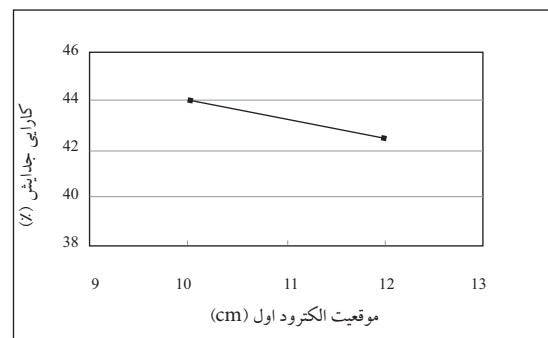
شکل ۱۶- تأثیر سرعت غلتک اول بر کارایی عملیاتی



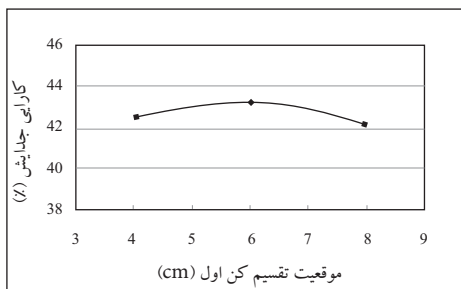
شکل ۱۲- تأثیر سرعت غلتک اول بر کارایی عملیاتی



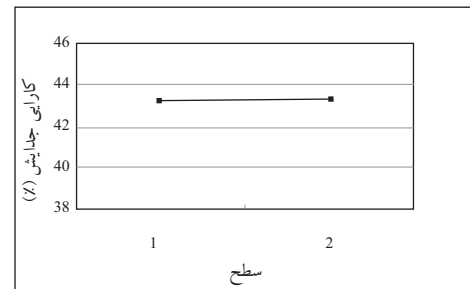
شکل ۱۷- تأثیر موقعیت الکترود اول بر کارایی عملیاتی



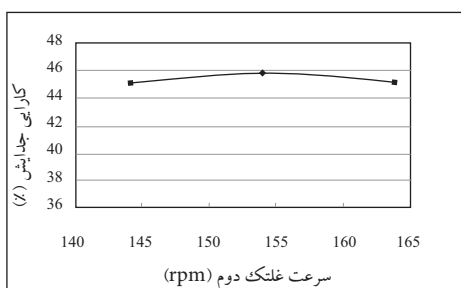
شکل ۱۳- تأثیر موقعیت الکترود اول بر کارایی عملیاتی



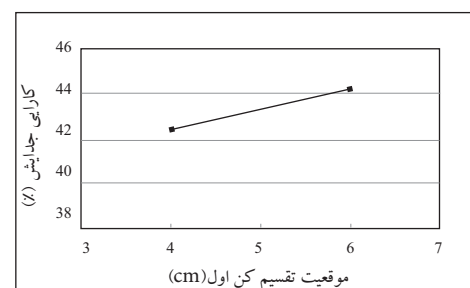
شکل ۱۸- تأثیر موقعیت تقسیم کن اول بر کارایی عملیاتی



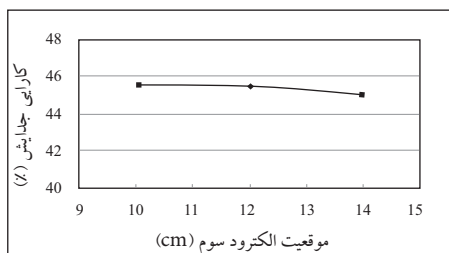
شکل ۱۴- اثر متقابل سرعت غلتک اول و موقعیت الکترود اول بر کارایی عملیاتی



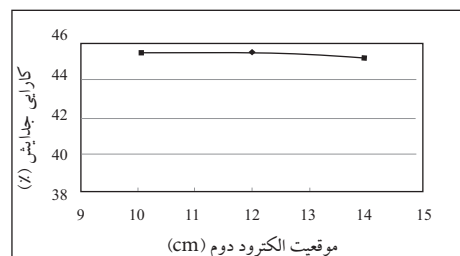
شکل ۱۹- تأثیر سرعت غلتک دوم بر کارایی عملیاتی



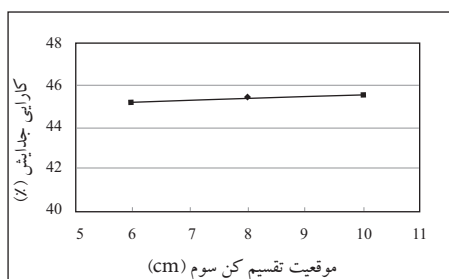
شکل ۱۵- تأثیر موقعیت تقسیم کن اول بر کارایی عملیاتی



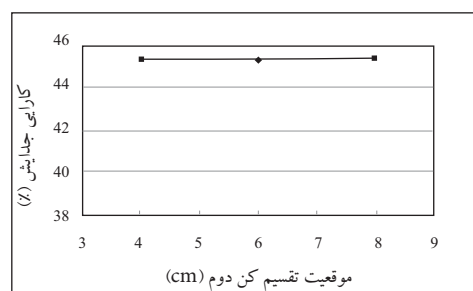
شکل ۲۳- تأثیر موقعیت الکترود سوم بر کارایی عملیاتی



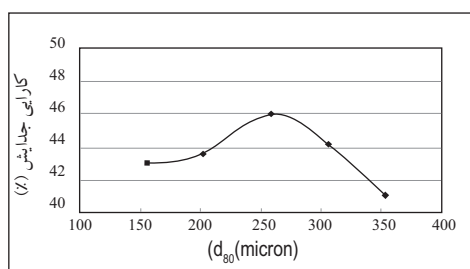
شکل ۲۰- تأثیر موقعیت الکترود دوم بر کارایی عملیاتی



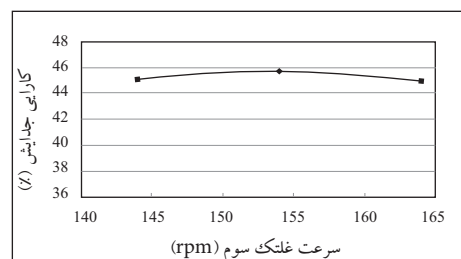
شکل ۲۴- تأثیر موقعیت تقسیم کن سوم بر کارایی عملیاتی



شکل ۲۱- تأثیر موقعیت تقسیم کن دوم بر کارایی عملیاتی



شکل ۲۵- تغییرات کارایی عملیاتی بر حسب d_{80} خوراک



شکل ۲۲- تأثیر سرعت غلتک سوم بر کارایی عملیاتی

کتابنگاری

- خدادادی، ا.، نصرآبادی، م.، ۱۳۸۳- "بررسی روشهای فرآوری تیتانیوم"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- شرکت مهندسين مشاور معدنکاو، ۱۳۶۸- «طرح مطالعاتی تولید دی اکسید تیتانیوم- گزارش مربوط به کانه آرائی ایلمنیت کهنوج».
- گروه مهندسين مشاور همکاری مشترک، ۱۳۷۴- «گزارش طرح آزمایشی خط تولید کنسانتره ایلمنیت کهنوج».
- نعمت اللهی، ح.، ۱۳۸۴- "کانه آرائی"، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران.

References

- Kelly, E.G. & Spottiswood, D.J. , 1989- "The theory of electrostatic separation" mineral engineering, Vol. 2.
- Manouchehri, H.R., Hanumantha Rao, K. & Forssberg, K.S.E., 2001- "Review of electrical separation methods", mineral and metallurgical processing, Vol. 17.
- Pearse, M.J. & Pope, M.I., 2001- "The triboelectric separation of quartz—calcite and quartz—apatite powders after chemical conditioning", powder technology, Vol. 17.
- Tarjan, G., 1986- "Electrical separation", mineral processing.