

سلام افلا



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

ارائه مدل سینتیکی فلوتاسیون ناپیوسته بر اثر تغییرات پارامترهای مؤثر
با تأکید بر محاسبه تابع ثابت نرخ سینتیک

دانشجو: معبود عسگری مهرآبادی

استاد راهنما:

دکتر محمد کارآموزیان

رساله جهت اخذ درجه دکتری فرآوری مواد معدنی

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۳۹, ۹۸, ۴۱۴
تاریخ: ۴۸-۷-۲۴
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای محمود عسگری مهرآبادی دانشجوی دکتری رشته فرآوری مواد معدنی به شماره دانشجویی ۹۲۱۶۵۹۵ ورودی مهر ماه سال ۹۲ در تاریخ ۹۸/۰۶/۲۴ از رساله خود با عنوان: ارائه مدل سینتیکی فلوناسیون ناپیوسته بر اثر تغییرات پارامترهای مؤثر با تأکید بر محاسبه تابع ثابت نرخ سینتیک دفاع و با اخذ نمره ۱۹ به درجه ۱۷ نائل گردید.

- الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ ☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد ☐

ردیف	هیئت داوران	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر محمد کاراموزیان	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر -	مشاور/مشاورین	-	
۳	دکتر اصغر عزیزی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۴	دکتر سید ضیاءالدین شفايي	استاد مدعو خارجی	استاد	
۵	دکتر فرامرز دولتی	استاد مدعو خارجی	استاد	
۶	دکتر فرهنگ سرشکی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	استاد	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

تاریخ و امضاء:



تقدیم به

روح پاک پدرم

که اگر بزرگ نشده بودم

او هنوز هم زنده بود ...

و مادرم

او که ناتوان شد تا به توانایی برسم

موهایش سپید شد تا رو سفید شوم

و عاشقانه سوخت تا گرمابخش وجودم و روشنگر راهم باشد

و همسرم

پناه خستگی و امید بودنم

که مهربانیش سایه سار زندگی

و آرامش حضورش مرهم دشواری‌هاست

تشکر و قدردانی

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این رساله را به پایان برسانم

با تقدیر و سپاس شایسته از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر محمد کارآموزیان که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه گشای نگارنده در اتمام و کمال این رساله بوده است. نمی‌توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استاد خویش آشکار نمایم، که هر چه گویم و سراپیم، کم گفته‌ام.

با تقدیر از دو استاد برجسته جناب آقای مهندس آصفی و جناب آقای دکتر نعمت‌الهی

که با وجودشان روحی به کالبد صنعت دمیدند و اگر حضورشان نبود

کانه‌آرایی در ایران در این جایگاه نمی‌بود.

و سپاس ویژه از مهندس کیانی بروجنی که این رساله با حمایت‌های ارزشمند مادی و معنوی ایشان انجام شده است. آزاد مردی که نیک می‌اندیشد و عقل و منطق را پیشه خود نموده و جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، هدفی ندارد.

با سپاسگزاری فراوان از دوستانم، محمد حسن گلپایگانی، محمود ملکی، حسین رافعی و ... که همواره در تمامی مراحل این رساله متحمل زحماتم بودند و مرا یاری رساندند.

تعهدنامه

اینجانب معبود عسگری مهرآبادی دانشجوی دوره دکتری رشته معدن گرایش فرآوری مواد معدنی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله «ارائه مدل سینتیکی فلوتاسیون ناپیوسته بر اثر تغییرات پارامترهای مؤثر با تأکید بر محاسبه تابع ثابت نرخ سینتیک» تحت راهنمایی آقای دکتر محمد کارآموزیان متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققین دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در این رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج شده از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۹۹/۰۷/۱۴

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در این تحقیق ابتدا پس از نمونه برداری و تهیه نمونه معرف، مطالعات اولیه بر روی نمونه معرف انجام شد. نتایج نشان داد که عیار سرب در نمونه حدود ۶/۵ درصد می باشد. در ابتدا آزمایش های فلوتاسیون اولیه بر روی نمونه معرف انجام شد تا بتوان مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر فلوتاسیون را تعیین کرد. جهت انجام این کار تأثیر پارامترهای مقدار کف ساز، مقدار سولفید کننده سولفید سدیم، کلکتورهای آمیل گزانتات پتاسیم ایزوبوتیل گزانتات سدیم و ایزوپروپیل گزانتات سدیم، میزان کلکتور، زمان خردایش، درصد جامد، pH، هوادهی در زمان آماده سازی، افزایش زمان آماده سازی، نرمه گیری، خردایش مجدد، رمق گیری و اضافه کردن مرحله ای کلکتور بررسی شدند. نتایج آزمایش های اولیه نشان دادند، پارامترهای pH، ابعاد ذرات، درصد جامد، مقدار سولفور سدیم، مقدار کلکتور و نوع کلکتور بیش از سایر پارامترها بر فلوتاسیون تأثیرگذار بوده و به همین دلیل آزمایش های سینتیکی فلوتاسیون با تغییر در همین پارامترها طراحی شدند و بهینه سازی با کمک نرم افزار DX10 و با استفاده از روش سطح پاسخ بر اساس روش مرکب مرکزی انجام شد. با کمک نتایج آزمایش ها و با استفاده از نرم افزار سیگماپلات، مناسب ترین مدل و پارامترهای آن از بین حدود ۱۴۰ مدل انتخاب گردید. لازم به ذکر است که در آزمایش های سینتیکی فلوتاسیون برای افزایش دقت و یکنواخت بودن آزمایش ها کف گیری به صورت خودکار انجام شد. پس از انجام آزمایش های سینتیکی، تطبیق بین نتایج آزمایشگاهی و مدل ها صورت گرفت. نتایج نشان داد که از بین مدل ها با ثابت سینتیک منفرد، معادله کلی به عنوان بهترین مدل بیشترین تطبیق را با نتایج آزمایشگاهی داشت که در آن مرتبه فلوتاسیون ۱/۸۷ به دست آمد که از آن به عنوان شبه مرتبه دوم یاد می شود. همچنین یک مدل ریاضی برای ارتباط بین ثابت سینتیک و مرتبه سینتیک ارائه شد که نتایج نشان داد مرتبه فلوتاسیون را می توان به صورت یک معادله لگاریتمی از ثابت سینتیک به دست آورد ($n = -0.214 \ln(k) + 1.0343$). در نهایت در طول زمان کف گیری ثابت سینتیک کاهش و مرتبه فلوتاسیون افزایش می یابد و رابطه بین مرتبه فلوتاسیون و ثابت سینتیک نسبت به زمان و بازیابی نیز به صورت مدل ریاضی بیان شد که نشان داد بازیابی حساسیت بیشتری نسبت به مرتبه فلوتاسیون دارد تا ثابت سینتیک. در مجموع با مقایسه بین کلیه مدل ها،

مدل فلوتاسیون سه بخشی (با هفت پارامتر)، با ثابت سینتیک تند، متوسط و کند، بیشترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی داشته است ($R^2 > 0.99$). ارتباط بین پارامترهای مدل با پارامترهای عملیاتی فلوتاسیون بررسی و به صورت یک مدل ریاضی معرفی شد. مدل‌های ارائه شده همبستگی خوبی با داده‌های تجربی نشان دادند ($R^2 > 0.80$). همچنین، شرایط بهینه فلوتاسیون سروزیت به ترتیب عبارتند از: $pH = 9$, $d_{80} = 53$ میکرون، محتوی جامد ۲۶ درصد، مقدار سولفور سدیم ۴۰۰۰ گرم بر تن و ۱۵۰۰ گرم بر تن کلکتور PAX. با بررسی تأثیرپذیری پارامترهای فلوتاسیون از پارامترهای مدل، نتایج نشان داد که مؤثرترین پارامتر بر k_1 اندازه ذرات است، درصد جامد کمترین تأثیر را بر k_2 دارد. مؤثرترین پارامترهای برای k_3 ، pH و اندازه ذرات هستند و مؤثرترین پارامتر بر R_∞ مقدار سولفور سدیم و pH است.

کلمات کلیدی: طبقه‌بندی مدل‌ها، سینتیک، مرتبه فلوتاسیون، سروزیت، بهینه‌سازی

لیست مقالات مستخرج شده از رساله دکتری

- ۱- بررسی جامع و طبقه‌بندی مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون ناپیوسته (اولین کنفرانس ملی مدل‌سازی در مهندسی معدن و علوم وابسته-قزوین)
- ۲- بهبود بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فلوتاسیون ناپیوسته با کمک سیستم کف‌گیری اتوماتیک (هفتمین کنفرانس مهندسی معدن ایران- انجمن مهندسی معدن ایران)
- ۳- بررسی پارامترهای مؤثر بر فلوتاسیون کانی کربناته سرب در مقیاس آزمایشگاهی (نشریه نشریه علمی-پژوهشی مهندسی منابع معدنی دانشگاه امام خمینی)
- 4- Proposing a seven parameter kinetics model for predicting cerussite flotation recovery (International Journal of Mining and Geo-Engineering)
- ۵- مدل‌سازی سینتیکی فلوتاسیون سروزیت در مقیاس آزمایشگاهی (نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن دانشگاه یزد)

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول	۱
کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- مدل های سینتیکی	۳
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق، سوالات و فرضیه های تحقیق	۵
۴-۱- اهداف تحقیق	۶
۵-۱- ساختار رساله	۷
فصل دوم	۹
مروری بر تحقیقات گذشته	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۱-۱-۲- مدل های با ثابت سینتیک منفرد	۱۰
۲-۱-۲- مدل های با ثابت سینتیک متغیر	۱۱
۳-۱-۲- مدل های توسعه یافته	۱۳
۲-۲- مروری بر مدل های سینتیکی فلوتاسیون	۱۳
۱-۲-۲- مدل مرتبه صفر	۱۳
۲-۲-۲- مدل مرتبه $0/5$	۱۵
۳-۲-۲- مدل مرتبه اول کلاسیک	۱۵
۴-۲-۲- مدل های مرتبه $1/5$ و بالاتر	۱۵
۵-۲-۲- مدل سینتیکی مرتبه اول با توزیع مستطیلی	۱۷
۶-۲-۲- مدل مرتبه اول با توزیع مثلثی	۱۸
۷-۲-۲- مدل مرتبه اول با توزیع سینوسی	۱۹
۸-۲-۲- مدل مرتبه اول با توزیع گاما	۲۰
۹-۲-۲- مدل مرتبه اول با توزیع نرمال	۲۴

- ۲۵-۱۰-۲-۲- مدل سینتیک مرتبه دوم با توزیع مستطیلی -----
- ۲۵-۱۱-۲-۲- مدل مرتبه اول دو مرحله ای -----
- ۲۶-۱۲-۲-۲- مدل سینتیک مرتبه اول با برگشت ذرات از کف به پالپ -----
- ۲۶-۱۳-۲-۲- مدل راکتور مخلوط کننده کامل -----
- ۲۷-۱۴-۲-۲- مدل جذب جامد/گاز -----
- ۲۷-۱۵-۲-۲- مدل با توزیع گسسته -----
- ۲۸-۱۶-۲-۲- مدل مرتبه اول کلاسیک با فاکتور اصلاح زمان صفر -----
- ۲۹-۱۷-۲-۲- مدل مرتبه اول با ثابت سینتیک متوسط -----

۳-۲- بررسی پارامترهای مختلف بر سینتیک فلوتاسیون ----- ۳۵

- ۳۵-۱-۳-۲- تأثیر ابعاد ذرات -----
- ۳۵-۲-۳-۲- تأثیر نرخ هوادهی -----
- ۳۶-۳-۳-۲- تأثیر ابعاد حباب -----
- ۳۶-۴-۳-۲- تأثیر مواد شیمیایی -----
- ۳۷-۵-۳-۲- سینتیک فلوتاسیون و مدل سازی -----
- ۴۴-۶-۳-۲- نقد و بررسی تحقیقات پیشین -----

فصل سوم ----- ۴۷

مواد و روش ها ----- ۴۷

۱-۳- معرفی معدن چاه گز ----- ۴۸

۲-۳- نمونه برداری، خردایش و تقسیم نمونه ها ----- ۴۹

۳-۳- شناخت نمونه ----- ۵۰

- ۵۰-۱-۳-۳- دانه بندی و آنالیز شیمیایی -----
- ۵۱-۲-۳-۳- مطالعات پراش اشعه ایکس (XRD) -----
- ۵۲-۳-۳-۳- مطالعات فلورسانس اشعه ایکس (XRF) -----
- ۵۲-۴-۳-۳- مطالعات میکروسکوپی -----
- ۵۶-۵-۳-۳- آزمایش های زمان خردایش -----

۴-۳- آزمایش های فلوتاسیون اولیه ----- ۵۷

- ۵۹-۱-۴-۳- بررسی تأثیر میزان کف ساز (روغن کاج) -----
- ۶۰-۲-۴-۳- بررسی تأثیر میزان سولفور سدیم -----
- ۶۲-۳-۴-۳- بررسی تأثیر نوع کلکتور -----
- ۶۳-۴-۴-۳- بررسی تأثیر میزان کلکتور -----

- ۳-۴-۵- بررسی تأثیر زمان خردایش ----- ۶۵
- ۳-۴-۶- بررسی تأثیر هوادهی در هنگام آماده‌سازی ----- ۶۶
- ۳-۴-۷- بررسی تأثیر زمان آماده‌سازی ----- ۶۸
- ۳-۴-۸- بررسی تأثیر نرمه‌گیری قبل از فلوئاسیون ----- ۶۹
- ۳-۴-۹- بررسی تأثیر درصد جامد پالپ ----- ۷۱
- ۳-۴-۱۰- بررسی تأثیر pH ----- ۷۲
- ۳-۴-۱۰- بررسی تأثیر خردایش مجدد ----- ۷۳
- ۳-۵- آزمایش‌های سینتیکی فلوئاسیون ----- ۷۵
- ۳-۵-۱- طراحی آزمایش‌های سینتیکی ----- ۷۵
- ۳-۵-۲- انجام آزمایش‌های سینتیکی ----- ۷۸

فصل چهارم ----- ۸۵

نتایج و یافته‌های تحقیق ----- ۸۵

- ۴-۱- کلیات مدل‌سازی ----- ۸۶
- ۴-۲- نتایج مدل‌سازی و تعیین مدل بهینه ----- ۹۲
- ۴-۳- بررسی مرتبه سینتیکی فلوئاسیون ----- ۹۹
- ۴-۴- جمع‌بندی مدل‌های فلوئاسیون ----- ۱۰۳

فصل پنجم ----- ۱۰۹

بحث و تحلیل نتایج ----- ۱۰۹

۵-۱- مقدمه ----- ۱۱۰

۵-۲- تجزیه و تحلیل نتایج فلوئاسیون و آنالیز واریانس ----- ۱۱۰

۵-۳- تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای فلوئاسیون بر پاسخ‌ها ----- ۱۱۶

- ۵-۳-۱- تأثیر پارامترهای فلوئاسیون بر k_1 ----- ۱۱۸
- ۵-۳-۲- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر k_2 ----- ۱۲۳
- ۵-۳-۳- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر k_3 ----- ۱۲۵
- ۵-۳-۴- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر Z_1 ----- ۱۲۶
- ۵-۳-۵- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر Z_2 ----- ۱۲۷

۱۲۸	۵-۳-۶- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر Z_3 -----
۱۳۰	۵-۳-۷- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر R_∞ -----
۱۳۲	۵-۴- نمودارهای آشفته‌گی پارامترهای مختلف بر پاسخ‌ها-----
۱۳۴	۵-۵- شرایط بهینه آزمایش-----
۱۳۴	۵-۶- اعتبارسنجی آزمایش تحت شرایط بهینه-----
۱۳۷	فصل ششم-----
۱۳۷	نتیجه‌گیری و پیشنهادها-----
۱۳۸	۶-۱- جمع‌بندی-----
۱۳۹	۶-۲- نتیجه‌گیری-----
۱۴۱	۶-۳- پیشنهادها-----
۱۴۱	۶-۳- نوآوری-----
۱۴۳	پیوست-----
۱۷۶	منابع-----

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

بی شک فلوتاسیون کارآمدترین روش کانه‌آرایی است و بیشترین کاربرد را در آرایش مواد معدنی دارد. این روش در سال ۱۹۰۶ پایه‌گذاری شد. با استفاده از این روش، بهره‌برداری از کنسارهای بزرگ با عیار کم و کانی‌سازی پیچیده امکان‌پذیر شده است (نعمت الهی ۱۳۸۷).

فلوتاسیون از جمله فرآیندهایی است که در ابتدا بدون داشتن درک کامل از آن در صنعت بکار گرفته شد و سپس جنبه‌های علمی آن تحت مطالعه قرار گرفت. مدل‌سازی در واقع بررسی سینتیک فلوتاسیون، شبیه‌سازی و مطالعه فرآیند با مدل‌های ریاضی در شرایط مختلف است. در مقایسه با فرآیندهای دیگر، مدل‌سازی فلوتاسیون کاربرد محدودتری دارد. دلیل همه جانبه نبودن مدل‌های فلوتاسیون، پیچیده بودن فرآیند و مشکل به دست آوردن پارامترهای مدل‌ها است (بنیسی ۱۳۸۷).

زمانی که پالپ در سلول در حال شناور شدن است مجموع احتمالاتی وجود دارد که سینتیک فلوتاسیون و احتمال راهیابی ذرات مورد نظر به کنسانتره را کنترل می‌کنند، این احتمالات عبارتند از (Ek, 1991):

- احتمال اتصال کلکتور به ذرات مورد نظر
- احتمال انتقال این ذرات به زون آشفته
- احتمال برخورد این ذرات با حباب هوا
- احتمال چسبیدن ذرات به حباب
- احتمال انتقال حباب حاوی ذره به کف
- احتمال باقیماندن حباب حاوی ذره در کف

عوامل مختلفی بر وقوع این احتمالات و به دنبال آن بر سینتیک فلوتاسیون مؤثر هستند که می‌توان آنها را به چهار دسته کلی تقسیم کرد که عبارتند از (Ek, 1991):

۱- فاکتورهای کانی‌شناسی (اندازه و شکل، درجه آزادی، نوع سطح کانی و وجود عناصر مزاحم در سطح کانی)

۲- فاکتورهای شیمیایی (کلکتورها، کف‌سازها، فعال‌کننده‌ها، بازداشت‌کننده‌ها و pH)

۳- فاکتورهای تجهیزات (طراحی سلول، همزن، شکل سلول، جریان سلول و کف‌گیری)

۴- فاکتورهای عملیاتی (سرعت و شکل همزن، درصد جامد، نرخ خوراک‌دهی، دما، روش‌های خردایش، جریان هوا و کف‌گیری)

۲-۱- مدل‌های سینتیکی

سینتیک فلوتاسیون اهمیت بالایی در طراحی سلول‌ها و بررسی تأثیر عوامل مختلف بر فلوتاسیون دارد. از طرفی استفاده از مدل‌سازی مزایایی همچون جایگزینی آزمایش‌های پرهزینه، آموزش کارکنان با نشان دادن تأثیر عوامل مختلف در فرآیند و صرفه‌جویی در زمان دارد. بنابراین مدل‌سازی سینتیکی فلوتاسیون می‌تواند در راستای بهبود فرآیندهای فلوتاسیون و کاهش زمان و هزینه بسیار سودمند باشد.

اولین مقاله درباره سینتیک فلوتاسیون در سال ۱۹۳۵ در شیلی توسط گارسیا-زونینگ^۱ به چاپ رسید. در این تحقیق مطابق معادله (۱-۱) نشان داده شد که بازیابی یک تابع نمایی از زمان است (Garcia-Zuniga, 1935).

$$-dC/dt = k(C)^n \quad (1-1)$$

که در آن:

C: غلظت مواد

t: زمان فلوتاسیون

k: ثابت سینتیک فلوتاسیون

n: مرتبه فلوتاسیون

کمی بعد مطالعات آزمایشگاهی تا مطالعات پیوسته توسعه داده شدند (Gaudin et al., 1942)، (Schuhmann, 1942) و (Beloglazov, 1939).

¹ Garcia-Zuniga

در سال ۱۹۵۰، توجه به سینتیک فلوتاسیون به واسطه مقاله آربتر^۱ دوباره احیا شد. وی نتایج مطالعات پیشین را به صورت یک معادله مرتبه دوم (معادله ۱-۲) ارائه داد. او داده‌های مورد نیاز خود را از مطالعات آزمایشگاهی و صنعتی به دست آورده بود (Arbiter, 1951).

$$dR/dt = k(R^* - R)^2 \quad (۲-۱)$$

که در آن:

R: بازیابی در زمان t

R*: بازیابی در زمان بینهایت

تحقیقات دیگر نشان داد که میزان مواد راه یافته به کنسانتره در صورت ثابت نگه داشتن پارامترهایی مانند نوع کانی، چگالی پالپ، pH، مواد شیمیایی، هوادهی، ابعاد ذرات و غیره به طور مستقیم با غلظت در ارتباط است (Arbiter, 1951). در سال ۱۹۵۱ معادله مرتبه دوم آربتر رد شده و معادله مرتبه اول ارائه شد (Morris, 1951). به اعتقاد برخی از محققان R_{∞} برابر است با ۱ و معادلات مرتبه اول و مرتبه دوم ارائه داده شد (Hukki, 1953). در سال ۱۹۵۶ تحقیقات دیگری با کمک آزمایش‌های پیوسته انجام شد و معادله مرتبه ۱/۵ بر مبنای معادله (۱-۱) ارائه داده شد (Morris, Horst, 1956). همچنین در سال ۱۹۵۶ معادلات سینتیکی تئوری با کمک آزمایش‌های ناپیوسته بررسی شد که نتایج این بررسی‌ها تأییدی بر مرتبه اول بودن سینتیک فلوتاسیون بود (Huber-Panu, 1956, 1959, 1961). در سال ۱۹۶۲ تحقیقات گسترده‌ای در شرایط آزمایشگاهی و صنعتی توسط آربتر و هریس^۲ انجام شد که در تمامی حالات معادلات سینتیکی مرتبه اول به دست آمد.

امروزه محققان بیشتر مدل مرتبه اول کلاسیک را به عنوان مدل سینتیکی فلوتاسیون به شمار می‌آورند در صورتی که این مدل سینتیکی تنها برای مواد همگن کارآیی دارند و نمی‌تواند جامعیت داشته باشد.

^۱ Arbiter

^۲ Harris

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق، سوالات و فرضیه‌های تحقیق

توسعه مدل سینتیکی کانی‌های مختلف کمک می‌کند که با در دست داشتن مدل سینتیکی و ثابت سینتیکی مناسب، بدون انجام آزمایش‌های اضافه، مقدار بازیابی را در زمان‌های مختلف پیش‌بینی کرد که این موضوع سبب کاهش زمان و هزینه‌ها خواهد شد. همچنین، با توجه به اهمیت فلوتاسیون در فرآوری مواد معدنی، با مدل‌سازی ریاضی، تغییرات شرایط بر نتایج قابل پیش‌بینی خواهد بود. در مدل‌های سینتیک فعلی، ثابت سینتیک با استفاده از منحنی سینتیک آزمایشگاهی و رسم مماس در مبدا به دست می‌آید که این شیوه محاسبه ثابت سینتیک تنها برای سینتیک مرتبه اول صادق بوده و همچنین سینتیک در زمان-های مختلف فرآیند به صورت لحظه‌ای در حال تغییر است که در این شیوه در نظر گرفته نمی‌شود. از این رو یک تابع ثابت سینتیک که بتواند بر اساس شرایط مختلف عملیاتی و در زمان‌های مختلف قابل محاسبه باشد ضرورت پیدا می‌کند. به این ترتیب بدون انجام آزمایش هم می‌توان ثابت سینتیک را تعیین و نرخ بازیابی را در زمان‌های مورد نظر پیش‌بینی کرد. از طرف دیگر در مورد فلوتاسیون سولفیدهای فلزی تحقیقات زیادی انجام شده است اما در مورد فلوتاسیون اکسیدهای فلزی و مخصوصاً مدل‌سازی آنها تحقیقات بسیار اندکی انجام شده است. از این رو در این تحقیق مدل‌سازی سینتیکی فلوتاسیون کربنات سرب با تاکید بر تعیین یک مدل برای ارتباط ثابت سینتیک بر پارامترهای عملیاتی فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفت.

حال با توجه به آنچه که گفته شد، سوالات تحقیق بر روی نمونه سرب کربناته به شرح ذیل ارائه

شدند:

- مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر فلوتاسیون چیست؟
- آیا دقت و تکرارپذیری سیستم کف‌گیری خودکار با سیستم کف‌گیری توسط اپراتور متفاوت است؟
- انواع مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون چیست و چه طبقه‌بندی می‌توان برای آنها متصور شد؟
- مدل سینتیکی نمونه معرف از چه نوعی می‌باشد؟

- بهترین تابع سینتیکی برای نمونه سرب کربناته کدام است؟
- تابع سینتیکی در چه مرتبه‌ای می‌باشد؟
- رابطه بین مرتبه فلوتاسیون و ثابت سینتیک چیست؟
- تغییرات مرتبه فلوتاسیون و ثابت سینتیک در طول زمان کف‌گیری به چه صورت می‌باشد؟
- آیا برای ثابت نرخ سینتیک می‌توان رابطه‌ای تعریف کرد که نیازی به انجام آزمایش نداشته باشد؟
- پارامترهای عملیاتی چه رابطه‌ای با تابع سینتیک دارند و در نهایت اینکه چه تأثیری بر آنها می‌گذارند؟

بر این اساس، فرضیه‌های تحقیق عبارتند از:

- مواد معدنی رفتارهای یکسانی در فلوتاسیون از خود نشان نمی‌دهند به همین دلیل می‌توان گفت هیچ مدل جامعی که بتوان آن را برای تمام نمونه‌ها مورد استفاده قرار داد، وجود ندارد. همچنین مرتبه و ثابت سینتیک برای تمامی مواد معدنی مختلف متفاوت هستند که این موضوع به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی ماده معدنی ارتباط دارد.
- پارامترهای عملیاتی بر مرتبه و ثابت سینتیک فلوتاسیون مؤثر هستند.

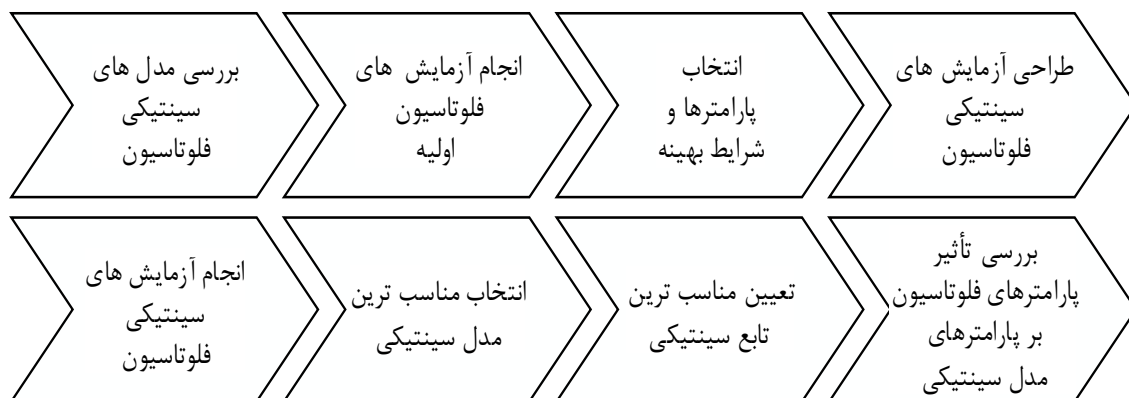
۴-۱- اهداف تحقیق

اهداف این تحقیق به صورت خلاصه در ادامه ارائه شده است.

- انتخاب مؤثرترین پارامترها و بازه‌های عملیاتی آنها بر فلوتاسیون سرب کربناتی
- شناسایی بهترین مدل سینتیکی فلوتاسیون به طوری که بیشترین همبستگی را با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.
- بررسی تأثیر کلیه پارامترهای قابل اندازه‌گیری و قابل کنترل مؤثر بر ثابت نرخ فلوتاسیون (k) و ارائه یک رابطه ریاضی بین آنها
- ارائه یک مدل سینتیکی فلوتاسیون برای کانی سرب کربناتی

۱-۵- ساختار رساله

این رساله مشتمل بر شش فصل است که فصل حاضر شامل کلیات، فصل دوم مروری بر تحقیقات گذشته، فصل سوم مواد و روش‌ها، فصل چهارم نتایج و یافته‌های تحقیق، فصل پنجم بحث و تحلیل نتایج و فصل ششم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها می‌باشند. خلاصه‌ای از روند انجام تحقیقات صورت گرفته در این رساله در شکل (۱-۱) ارائه شده است.



شکل ۱-۱- روند انجام مطالعات و آزمایش‌ها

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- مقدمه

به دلیل اینکه تمرکز این رساله بر مدل سازی سینتیکی فرآیند می باشد، در ابتدا مدل ها و تحقیقات قبلی ارائه شده، معرفی و بررسی می شوند. پیشتر طبقه بندی مشخصی برای مدل های سینتیکی فلوتاسیون ارائه نشده است. با توجه به مقالات مطالعه شده و تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین، در این رساله یک طبقه بندی برای مدل های سینتیکی فلوتاسیون به صورت ذیل ارائه شده است.

- مدل های با ثابت سینتیک منفرد

- مدل های با ثابت سینتیک متغیر

○ مدل های سینتیکی فلوتاسیون با نرخ ثابت گسسته

○ مدل های سینتیکی فلوتاسیون با توزیع نرخ ثابت پیوسته

○ مدل های سینتیکی فلوتاسیون با نرخ متوسط

- مدل های سینتیکی توسعه یافته

در ادامه هر یک از این مدل ها جداگانه شرح داده شده اند.

۲-۱-۱- مدل های با ثابت سینتیک منفرد

نخستین مدل های ارائه شده توسط محققان در این دسته قرار می گیرند. در این نوع از مدل ها، ثابت سینتیک به صورت یک عدد منفرد در نظر گرفته می شود که خود می تواند از مرتبه صفر و بالاتر برخوردار باشد. از مهمترین مدل های این دسته می توان به مرتبه اول کلاسیک، مرتبه دوم راکتور مخلوط کامل، جذب جامد/گاز و ... اشاره کرد.

بطور کلی ثابت سینتیک فلوتاسیون برای یک فرآیند از مرتبه n دارای واحد $^{-1}(\text{زمان})^{-n}(\text{وزن})$ است.

با توجه به اینکه در این نوع از مدل ها برای همه ذرات با خواص یکسان، یک ثابت سینتیک منفرد در نظر گرفته می شود، از اینرو می توان گفت این مدل ها برای نمونه های صد در صد همگن و یکنواخت کاربرد

دارند. همچنین از طرفی با توجه به اینکه در عمل چنین نمونه‌ای در واقعیت وجود ندارد، لذا این دسته از مدل‌ها حتی با وجود عمومیت داشتن و محبوبیت، چندان با نتایج آزمایشگاهی تطابق ندارند.

۲-۱-۲- مدل‌های با ثابت سینتیک متغیر

از آنجا که ذرات در سلول فلوتاسیون خواص یکسانی ندارند و پالپ یکنواخت نیست، می‌توان گفت نرخ فلوتاسیون نمی‌تواند منفرد باشد. این مدل‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند.

- مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون با نرخ ثابت گسسته
- مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون با توزیع نرخ ثابت پیوسته
- مدل سینتیکی فلوتاسیون با نرخ متوسط

الف) مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون با نرخ ثابت گسسته

چند مدل با نرخ ثابت گسسته وجود دارد که تفاوت‌هایی اندکی مانند تعداد پارامترهای تشکیل دهنده و حضور و عدم حضور بازیابی بی‌نهایت، دارند.

این مدل‌ها توسط محققانی مانند موریس^۱ (۱۹۵۲)، کلسال^۲ (۱۹۶۱ و ۱۹۷۱)، جوئت^۳ (۱۹۷۴) و ایمازومی^۴ (۱۹۶۵) ارائه شده‌اند.

از مهمترین مدل‌های این دسته می‌توان به دو مدل زیر اشاره کرد.

مدل با دو ثابت سینتیک ذرات شناور شونده تند و کند که مطابق معادله (۱-۲) است (Kelsall

1961).

$$R=(1-z)(1-e^{-k_f t}) + z(1-e^{-k_s t}) \quad (1-2)$$

¹ Morris

² Kelsall

³ Jowett

⁴ Imaizumi

و مدل ذرات شناور شونده تند و کند و متوسط که مطابق معادله (۲-۲) است (Jowett 1974).

$$R=a_1(1-e^{-k_f t}) + a_2(1-e^{-k_m t}) + a_3(1-e^{-k_s t}) \quad (2-2)$$

که در آن:

k_s و k_m ، k_f به ترتیب ثابت سینتیک تند، متوسط و کند

a_1 ، a_2 و a_3 (Z): به ترتیب جزء شناور شونده تند، متوسط و کند

(ب) مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون با توزیع نرخ ثابت پیوسته

در این مدل‌ها فرض بر آن است که نرخ فلوتاسیون بین صفر تا K_m (نرخ بیشینه) توزیع می‌شود. مدل‌های ریاضی آن توسط کاپور^۱ (۱۹۷۴)، لاودی^۲ (۱۹۶۶)، وودبرن^۳ (۱۹۶۵)، هریس^۴ (۱۹۷۰) و بال و همکارانش^۵ (۱۹۷۱) و یاناتوس و همکارانش^۶ (۲۰۱۰) ارائه شده است. رابطه عمومی این دسته از مدل‌ها بر اساس معادله ارائه شده در فرمول (۳-۲) است.

$$R(t)= R_{\infty}[1-\int_0^{\infty} f(k) \exp(-kt) dk] \quad (3-2)$$

که در آن، $f(k)$ تابع توزیع ثابت سینتیک می‌باشد.

با تغییر پارامتر $f(k)$ محققان برای مدل‌سازی سینتیکی فلوتاسیون به مدل‌های مختلفی دست یافتند که شامل مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون با تابع توزیع مستطیلی، مثلثی، سینوسی، گاما و نرمال می‌باشد. لازم به ذکر است که در هر یک از این مدل‌ها چند مدل با تغییر در تعداد پارامتر و ... وجود دارد.

در حالت دو پارامتری نسبت بازیابی به بازیابی بی‌نهایت شامل دو پارامتر k و t است و در مدل سه پارامتری انحراف معیار نیز نقش تعیین کننده دارد. همچنین، در مدل‌های سه پارامتری به جای k از پارامتر μ که برابر میانگین k ها است استفاده می‌شود. مدل‌های ذکر شده در بخش (۲-۲) ارائه خواهند شد (Zhang 1989).

¹ Kapur

² Loveday

³ Woodburn

⁴ Harris

⁵ Ball et al.

⁶ Yianatos et al.

ج) مدل سینتیکی فلوتاسیون با نرخ متوسط

مدل سینتیکی فلوتاسیون با نرخ متوسط (مدل چن^۱) در سال‌های ۱۹۷۸ و ۱۹۸۲ توسط چن ارائه شد (Chen 1978, 1982). مدل نرخ متوسط بر این فرض استوار است که نرخ فلوتاسیون با نرخ متوسط سینتیک متناسب است (Xu C.L. 1984)، (Yin D. 1986)، (Chen, Mular 1982) و (Chen, Wu 1978).

۲-۱-۳- مدل‌های توسعه یافته

برخی از محققان با تغییر در مدل‌های قبلی آن‌ها را بهبود داده و به نوعی اصلاح کرده‌اند. از این دسته می‌توان به مدل مرتبه اول کلاسیک با فاکتور اصلاح زمان (Agar and barrett 1983)، مدل با توزیع گامی اصلاح شده (Loveday 1966) و (Zhang 1989) و مدل با ثابت سینتیک متوسط اصلاح شده (Zhang 1989) و ... را نام برد.

۲-۲- مروری بر مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون

مقالات زیادی تاکنون در خصوص سینتیک فلوتاسیون و مدل‌های مربوطه نوشته شده است. در این بخش سعی شده تا تمامی مدل‌های ارائه شده از سوی محققان برای سینتیک فلوتاسیون آورده شوند.

۲-۲-۱- مدل مرتبه صفر

پیش از آنکه در خصوص مدل مرتبه صفر توضیح داده شود، ابتدا تحقیقاتی را که توسط برخی محققین در سال ۱۹۵۹ پایگذاری شد ارائه می‌شود. در این تحقیقات نشان داده شده است، مرتبه سینتیک در طول فرآیند شناورسازی تغییر می‌کند. این تحقیقات نشان داد که مرتبه فلوتاسیون برای نمونه‌های غیر همگن می‌تواند از صفر تا ۶ تغییر کند. این مدل‌ها شامل مرتبه‌های صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ است (Bogdanov et al. 1959, 1964) و (Brozek, Mlynarczykowska 2007).

¹ Chen's model

همانطور که اشاره شد، طبق مدل گارسیا-زونینگا در سال ۱۹۳۵، مدل (۱-۱) برای سینتیک ذرات از نقطه نظر خواص سطحی همگن است. این مدل با شرایط اولیه به معادله (۴-۲) تبدیل خواهد شد.

$$C(t)=[(n-1)kt+C_0^{(1-n)}]^{\frac{1}{1-n}} \quad \text{for} \quad n \neq 1 \quad (4-2)$$

که در آن:

C_0 و $C(t)$: به ترتیب غلظت اولیه ذرات و غلظت آن در زمان t می باشد.

با توجه به اینکه

$$R=\frac{C_0-C}{C_0} \quad (5-2)$$

در نتیجه

$$R=1-[1+(n-1)C_0^{(n-1)}kt]^{\frac{1}{1-n}} \quad \text{for} \quad n \neq 1 \quad (6-2)$$

و در حضور بازیابی بی نهایت

$$R=R_{\infty} \left\{ 1-\frac{1}{[1+(n-1)(C_0^{(n-1)}kt)]^{\frac{1}{n-1}}} \right\} \quad \text{for} \quad n > 1 \quad (7-2)$$

برای سینتیک مرتبه صفر و ۰/۵ داریم

$$R(t)=C_0^{n-1}kt \quad (8-2)$$

برای $n=0$ داریم (Brozek, Mlynarczykowska 2007).

$$R(t)=\frac{kt}{C_0} \quad (9-2)$$

معادله (۹-۲) مدل سینتیکی برای مرتبه صفر است. در عملیات فلو تاسیون اگر سلول با ذرات قابل شناور اشباع شود چون مقدار ماده ای که توسط حباب ها می تواند حمل شود ثابت است، در نتیجه نرخ انتقال ذرات به کنسانتره مستقل از ماده قابل شناور می باشد، در این حالت نرخ شناور شدن ذرات نسبت به مقدار ماده از سینتیک مرتبه صفر پیروی می کند (بنیسی ۱۳۸۷).

۲-۲-۲- مدلهای مرتبه ۱/۵

با توجه به آنچه که گفته شد برای $n=0.5$ داریم (Garcia-Zuniga 1935) و (Bogdanov et al. 1959,) (1964).

$$R(t) = \frac{kt}{\sqrt{C_0}} - \frac{k^2 t^2}{4C_0} \quad (۱۰-۲)$$

۲-۲-۳- مدل مرتبه اول کلاسیک

برای مدل سینتیکی مرتبه ۱ با فرض $m = \frac{1}{1-n}$ از معادله (۸-۲) داریم:

$$R = R_{\infty} \{ 1 - [1 - C_0^{-\frac{1}{m}} \frac{kt}{m}]^m \} \quad (۱۱-۲)$$

اگر n به سمت ۱ میل کند در نتیجه m به سمت بی‌نهایت میل می‌کند (Brozek, Mlynarczykowska 2007). در نتیجه

$$\lim R_m(t) = R(t) = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (۱۲-۲)$$

از طرفی دیگر، این مدل با ساده‌سازی مدل ارائه شده توسط گارسیا زونگا نیز به دست می‌آید (Garcia-Zuniga 1935). این مدل برای خوراک همگن^۱ (دارای ذراتی با قابلیت فلوتاسیون یکسان) و سیستم‌های با جریان پیستونی توصیه شده است. از طرفی این مدل بیش از سایر مدل‌ها برای مدل‌سازی فرآیندهای فلوتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲-۴- مدل‌های مرتبه ۱/۵ و بالاتر

برای مدل‌های سینتیکی مرتبه‌های بالاتر از یک با جای‌گذاری مقدار اعداد ۱/۵ تا ۶ به جای n در معادله (۷-۲) مدل‌های مربوطه حاصل می‌شوند (Brozek, Mlynarczykowska 2007). مدل مرتبه ۱/۵ در

¹ Monodisperse

معادله (۱۳-۲) ارائه شده است (Morris, Horst 1956, 1964)، (Garcia-Zuniga 1935) و (Bogdanov et al. 1959). مدل‌های مرتبه‌های ۲ تا ۶ به ترتیب در معادلات (۱۴-۲) تا (۱۹-۲) ارائه شده است.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{1}{2} \sqrt{C_o} k t + 1 \right)^2} \right] \quad (13-2)$$

که در آن:

ε_t : بازیابی در زمان t

ε_{∞} : بازیابی در زمان بی‌نهایت

مدل سینتیکی مرتبه ۲ توسط آربیتزر در سال ۱۹۵۱ ارائه شد. این مدل دو پارامتری که توصیف کننده فلوئتاسیون موادی با خوراک همگن (دارای ذراتی با قابلیت فلوئتاسیون یکسان) است در معادلات (۲-۲) و (۱۴-۲) نشان داده شده است (Arbiter 1951).

$$R = R_{\infty}^2 \frac{kt}{1 + R_{\infty} kt} \quad (14-2)$$

و یا

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \frac{C_o k t}{1 + C_o k t} \quad (15-2)$$

در این مدل زمانی که R_{∞} بزرگ شود تأثیر آن بیشتر خواهد بود.

مدل سینتیکی مرتبه ۳ در معادله (۱۶-۲) ارائه شده است (Bogdanov et al. 1959, 1964) و (Garcia-Zuniga 1935). همانطور که پیشتر نیز به آن اشاره شد، مدل‌های سینتیکی مرتبه ۳ و بالاتر در طول فرآیند کف‌گیری رخ خواهند داد.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 2 C_o^2 k t}} \right] \quad (16-2)$$

مدل مرتبه ۴:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \left[1 - \frac{1}{\sqrt[3]{1 + 3 C_o^3 k t}} \right] \quad (17-2)$$

مدل مرتبه ۵:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \left[1 - \frac{1}{\sqrt[4]{1 + 4 C_o^4 k t}} \right] \quad (18-2)$$

مدل مرتبه ۶:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \left[1 - \frac{1}{\sqrt[5]{1 + 5 C_o^5 k t}} \right] \quad (19-2)$$

۲-۲-۵- مدل سینتیکی مرتبه اول با توزیع مستطیلی

همانطور که پیشتر گفته شد، در معادله (۳-۲) با مقادیر مختلف از $f(k)$ ، مدل‌های مختلفی به دست خواهد آمد. در سال ۲۰۰۰ تحقیقات زیادی بر روی سینتیک فلوتاسیون با توزیع‌های پیوسته از جمله مستطیلی، مثلثی، سینوسی، گاما و نرمال انجام شد (Polat, Chander 2000). در مدل دو پارامتری با توزیع مستطیلی $f(k)$ برابر است با

$$\begin{aligned} 0 & @ K < k < \infty \\ 1/K & @ 0 < k \leq K \end{aligned} \quad (20-2)$$

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل دو پارامتری با توزیع مستطیلی به صورت معادله (۲۱-۲) به دست خواهد آمد.

$$(1 - e^{-Kt})/Kt \quad (21-2)$$

این مدل که در سال ۱۹۷۶ ارائه شده نیز برای خوراک همگن با توزیع مستطیلی بوده و به مکانیزم کف‌گیری وابسته است (Huber-Panu 1976). از خصوصیات این مدل انعطاف پذیر بودن آن است. کلایمپل^۱ در دهه ۸۰ میلادی تحقیقات زیادی را بر روی این مدل انجام داده به همین دلیل این مدل را به نام وی نیز می‌شناسند.

در مدل سه پارامتری مقدار $f(k)$ برابر است با

$$\begin{aligned} 0 & \leq k < \mu - (w)/2 \\ (1)/(w) & @ \mu - (w)/2 \\ & \leq k \leq \mu + (w)/2 \\ 0 & @ \mu + (w)/2 < k < \infty \end{aligned} \quad (22-2)$$

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل سه پارامتری به صورت معادله (۲۳-۲) به دست خواهد آمد.

$$(e^{-\mu t + (wt)/2} - e^{-\mu t (wt)/2}) / wt \quad (23-2)$$

که در آن:

μ : مقدار میانگین k ها

w : انحراف از معیار

۲-۲-۶- مدل مرتبه اول با توزیع مثلثی

مدل دو و سه پارامتری با توزیع مثلثی اولین بار در سال ۱۹۷۰ ارائه شده است (Harris,)

(Chakravarti 1970).

در مدل دو پارامتری آن $f(k)$ برابر است با

$$\begin{aligned} 4k/K^2 & @ 0 \leq k < (K)/2 \\ 4(K-k)/K^2 & @ (K)/2 < k \leq K \\ 0 & @ K < k < \infty \end{aligned} \quad (24-2)$$

¹ Klimpel

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل دو پارامتری به صورت معادله (۲۵-۲) به دست خواهد آمد.

$$\frac{(1 + e^{-Kt} - 2e^{Kt/2})}{((Kt/2)^2)} \quad (25-2)$$

در مدل سه پارامتری آن $f(k)$ برابر است با

$$\begin{aligned} 0 @ 0 \leq k < (2\mu - w)/2 \\ (4(k - \mu + (w/2)))/w^2 \\ @ (2\mu - w)/2 \leq k < \mu \\ (4(2\mu - k))/w^2 \\ @ \mu < k \leq (2\mu + w)/2 \\ 0 @ (2\mu - w)/2 < k < \infty \end{aligned} \quad (26-2)$$

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل سه پارامتری به صورت معادله (۲۷-۲) به دست خواهد آمد.

$$(e^{(wt)/2} + e^{(wt)/2} - 2)/(e^{-\mu t}(wt/2)^2) \quad (27-2)$$

۲-۲-۷- مدل مرتبه اول با توزیع سینوسی

مدل دو و سه پارامتری با توزیع سینوسی اولین بار در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است (Diao et al. 1992).

در مدل دو پارامتری آن $f(k)$ برابر است با

$$\begin{aligned} (\pi/2K)\text{Sin}(\pi k/2K) @ 0 \leq k \leq K \\ 0 @ K < k < \infty \end{aligned} \quad (28-2)$$

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل دو پارامتری به صورت معادله (۲۹-۲) به دست خواهد آمد.

$$\frac{(1 - (2Kt/\pi)e^{-Kt})}{(1 + (2Kt/\pi))^2} \quad (29-2)$$

در مدل سه پارامتری با توزیع سینوسی $f(k)$ برابر است با

$$\begin{aligned} 0 @ 0 \leq k < \mu - (2w)/3 \\ (\pi)/(2w)\text{Sin}((\pi(k - \mu)))/ \\ 2w + (\pi/3) @ \mu - (2w)/ \\ (3) \leq k \leq \mu + (2w/6) \\ 0 @ \mu + (2w)/(6) < k < \infty \end{aligned} \quad (30-2)$$

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل سه پارامتری به صورت معادله (۳۱-۲) به دست خواهد آمد.

$$\frac{(e^{-\mu t + (2wt)/(3)} - (2wt)/(\pi))}{e^{-\mu t(2wt)/(6)} / (1 + (2wt/\pi)^2)} \quad (31-2)$$

۲-۲-۸- مدل مرتبه اول با توزیع گاما

مدل‌های با توزیع گاما اولین بار توسط محققان ژاپنی ایموزومی و اینو^۱ در سال ۱۹۶۳ و لاودی و وودبرن در سال‌های ۱۹۶۵ و ۱۹۶۶ ارائه شده و هریس و کاپور نیز مدل‌هایی طبق توزیع گاما ارائه دادند و Yianatos و همکارانش در سال ۲۰۱۰ تحقیقات زیادی را در این زمینه ارائه دادند.

در مدل دو پارامتری آن $f(k)$ برابر است با

$$\frac{((k/K)^{n-1} e^{(-k/K)})}{(k \Gamma(n))} \quad (32-2)$$

که در آن:

Γ : پارامتر تابع گاما

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل دو پارامتری به صورت معادله (۳۳-۲) به دست خواهد آمد.

$$(1)/((1 + Kt)^n) \quad (33-2)$$

در برخی مقالات از سایر مدل‌های ارائه شده (معادله ۳۴-۲) استفاده شده است. این مدل توسط

هریس ارائه شده است (Harris 1970).

$$\frac{df(t)}{dt} = \int \frac{1}{K_m \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{k}{K_m}\right)^{(n-1)} \cdot \exp\left(-\frac{k}{K_m}(1 + K_m \cdot t)\right) dk \quad (34-2)$$

که در آن:

¹ Inoue

$F(t)$: بازیابی

$\Gamma(n)$: تابع گاما

K : نرخ فلوتاسیون

K_m : ضریب تصحیح (نرخ سینتیک بیشینه)

t : زمان فلوتاسیون

با تبدیل لاپلاس و انتگرال از صفر تا بی‌نهایت نسبت به معادله (۳۴-۲)، معادله (۳۵-۲) به دست خواهد آمد (Kapur 1974).

$$f(t) = \left(\frac{1}{1 + k_m \cdot t} \right)^{(n+1)} \quad (35-2)$$

در تحقیقی دیگر مدل مشابهی برای تابع گاما ارائه داده شد (معادله ۳۶-۲) (Loveday 1966).

$$R = \frac{b^{(a)}}{\Gamma(a)} \cdot k^{a-1} \cdot \exp(-b \cdot k) \quad (36-2)$$

که در آن:

a و b : پارامترهای مدل

$f(t)$: تابع توزیع k در زمان t

گفتنی است که با فرض $a=n$ و $b=1/k_m$ معادله (۳۶-۲) با معادله (۳۲-۲) برابر خواهد بود. همچنین در برخی مقالات از مدلی مطابق معادله (۳۷-۲) استفاده شده است.

$$R = R^* \left(1 - \left(\frac{a}{a+t} \right)^P \right) \quad (37-2)$$

که در آن:

R : بازیابی

a و p: پارامترهای مدل

همانطور که پیشتر اشاره شد، در صورتی که از جفت مدل گاما استفاده شود، مدل دو پارامتری مرتبه اول با توزیع گامای جفت مطابق معادله (۳۸-۲) به دست خواهد آمد.

$$f(t) = \left(\frac{a}{1+t} \right)^n + \left(\frac{1-a}{1+t} \right)^m \quad (38-2)$$

که در آن:

a، n و m: پارامترهای مدل

در مدل سه پارامتری با توزیع گاما f(k) برابر است با

$$\frac{k^{\frac{\mu^2}{\sigma^2}-1} e^{-\frac{\mu k}{\sigma^2}}}{\Gamma\left(\frac{\mu^2}{\sigma^2}\right) \left(\frac{\sigma^2}{\mu}\right)^{\frac{\mu^2}{\sigma^2}}} \quad (39-2)$$

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_\infty$ برای مدل سه پارامتری به صورت معادله (۴۰-۲) به دست خواهد آمد.

$$\left(\frac{\mu + \sigma^2 t}{\mu} \right)^{\frac{\mu^2}{\sigma^2}} \quad (40-2)$$

لازم به ذکر است که مدل‌های با توزیع گاما بیشتر برای سیستم‌های پیوسته کاربرد دارد.

مدل با توزیع گامای اصلاح شده با کمک آنالیز مدل اصلاح شده چن و تابع گاما و از معادله (۳۴-۲)،

معادله (۴۱-۲) به دست آمد (Zhang 1989).

$$K(t) = \frac{n \cdot K_m}{1 + K_m \cdot t} \quad (41-2)$$

که در آن:

n برابر است با نسبت K_0 به K_m

تابع توزیع گامای پیشنهاد شده در سال ۱۹۷۰ طبق معادله (۴۲-۲) است (Harris, Chakravarti 1970).

$$\Phi(k, 0) = \frac{1}{K_m \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{k}{K_m}\right)^{(n-1)} \cdot \exp\left(-\frac{k}{K_m}\right) \quad (42-2)$$

که در آن:

$\Phi(k, 0)$: تابع توزیع با نرخ ثابت فلوتاسیون

K_m : نرخ فلوتاسیون حداکثر

$\Gamma(n)$: تابع گاما

n : توان تابع گاما

راندمان وزنی و بازیابی عیاری برای تابع توزیع گاما مطابق معادلات (۴۳-۲) ارائه شده است (Loveday, Woodburn 1965).

$$R(k, 0) = M \cdot \exp(-k) \cdot k^{(m-1)} \quad (43-2)$$

که در آن:

m پارامتر و M ضرایب تابع گاما هستند که طبق معادلات (۴۴-۲) به دست می آیند.

$$M = \frac{1}{\int_0^{K_m} \exp(-k) \cdot k^{(m-1)} dk} \quad (44-2)$$

همانطور که نشان داده می شود با افزایش k تا بی نهایت، بازیابی نیز به بی نهایت میل می کند که این غیر ممکن است پس می توان نتیجه گرفت k به بی نهایت میل نخواهد کرد. پس می توان مدل با توزیع گامای اصلاح شده را به صورت معادلات (۴۵-۲) ارائه داد.

$$\frac{R(t)}{R_{\infty}} = \int_0^{K_m} M \cdot \exp(-k + k \cdot t) \cdot k^{(m-1)} \cdot dk \quad (45-2)$$

دربارهٔ این مدل پیشتر به طور مفصل صحبت شد. معادلات (۴۶-۲) به ترتیب مربوط به عیار و بازیابی است (Zhang, 1989).

$$R_c(t) = 1 - \int_0^{K_m} M \cdot \exp(-k + k \cdot t) k^{(m-1)} \cdot dk \quad (46-2)$$

۹-۲-۲- مدل مرتبهٔ اول با توزیع نرمال

مدل‌های با توزیع نرمال اولین بار در سال ۲۰۰۰ ارائه شده است (Loveday, Ferreira 2000).

در مدل دو پارامتری آن $f(k)$ برابر است با

$$\frac{3}{\mu\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{9}{2}\left(\frac{k}{\mu}-1\right)^2} \quad 0 \leq k \leq 2\mu \quad (47-2)$$

$$0 < k < \infty$$

در نتیجه مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل دو پارامتری به صورت معادلهٔ (۴۸-۲) به دست خواهد آمد.

$$\frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\mu t + 3}{\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\mu t - 3}{\sqrt{2}}\right)}{2e^{\mu t - \frac{\mu^2 t^2}{18}}} \quad (48-2)$$

در مدل سه پارامتری با توزیع نرمال $f(k)$ برابر است با

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{k-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (49-2)$$

$$0 \leq k \leq 2\mu \quad 0 < k < \infty$$

در نتیجه، مقدار $1-R(t)/R_{\infty}$ برای مدل دو پارامتری به صورت معادلهٔ (۵۰-۲) به دست خواهد آمد.

$$\frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\sigma t + \frac{\mu}{\sigma}}{\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma t - \frac{\mu}{\sigma}}{\sqrt{2}}\right)}{2e^{\mu t - \frac{\sigma^2 t^2}{2}}} \quad (50-2)$$

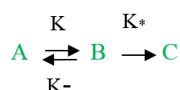
۲-۲-۱۰- مدل سینتیکی مرتبه دوم با توزیع مستطیلی

زمانی که موازنه جرم مرتبه دوم ترکیبات فلوتاسیون از توزیع مستطیلی پیروی کنند مدل فلوتاسیون به صورت معادله (۵۱-۲) ارائه خواهد شد (Ek 1991).

$$R=R_{\infty}\left(1-\frac{\ln(1+kt)}{kt}\right) \quad (51-2)$$

۲-۲-۱۱- مدل مرتبه اول دو مرحله‌ای

با توجه به سیستم‌های فلوتاسیون که شامل حجم پالپ و کف مجزا است، یک مدل فیزیکی مبنی بر انتقال مواد از پالپ به کف و از کف به کنسانتره ارائه داده شد (Meyer, Klimpel 1984). این موضوع به صورت زیر نشان داده شده است.



که در آن:

A: غلظت ترکیبات در پالپ

B: غلظت ترکیبات در کف

C: ترکیبات بازیابی شده

K: سینتیک مواد از پالپ به کف

K-: سینتیک مواد از کف به پالپ

K*: سینتیک مواد از کف به کنسانتره

با فرض اینکه نرخ زهکشی از کف حداقل باشد، مقدار K خیلی بزرگتر از مقدار K- است و می‌توان از

آن در معادلات صرف نظر کرد. شکل ریاضی این مدل مطابق معادله (۵۲-۲) است.

$$R=R_{\infty}\left(\frac{k}{k-k^*}(1-e^{-k^*t})-\frac{k^*}{k-k^*}(1-e^{-kt})\right) \quad (52-2)$$

این معادله یک مدل ۳ پارامتری است که فرآیند دو مرحله‌ای مرتبه اول را توصیف می‌کند.

۲-۲-۱۲- مدل سینتیکی مرتبه اول با برگشت ذرات از کف به پالپ

این مدل بر اساس انتقال ذرات به کف و به دنبال آن زهکشی بخشی از ذرات به پالپ بنا شده است و مطابق معادله (۵۳-۲) ارائه شده است (Ek 1991).

$$R=R_{\infty}\frac{k}{k+k_-}(1-e^{-(k+k_-)t}) \quad (53-2)$$

که در آن:

k_- ثابت سینتیک برگشت ذرات است.

همانطور که مشاهده می‌شود در صورتی که k_- ناچیز باشد مدل کلاسیک به دست خواهد آمد.

۲-۲-۱۳- مدل راکتور مخلوط کننده کامل

محققان ژاپنی نشان دادند که نتایج فلوتاسیون را می‌توان در معادله غلظت-زمان برای یک سری از راکتورهای مخلوط کامل ارائه داد. با بررسی نتایج و اضافه کردن پارامتر بازیابی معادله (۵۴-۲) را ارائه دادند (Inoue, Imaizumi 1963).

$$R=R_{\infty}\left(1-\frac{1}{1+\frac{t}{K}}\right) \quad (54-2)$$

این مدل معادله مرتبه اول زمان-بازیابی را برای خوراک همگی ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که این مدل زمانی به کار می‌رود که توزیع مواد قابل شناور شدن به صورت نمایی باشد.

۲-۲-۱۴- مدل جذب جامد/گاز

طی تحقیقاتی تابع سینتیکی جذب جامد/گاز (معادله ۲-۵۵) ارائه داده شد (Meyer, Klimpel 1984).

$$R = \frac{k t}{(1 + k t)^m} \quad (2-55)$$

این مدل تفاوت زیادی با مدل‌های قبلی دارد. در این مدل از پارامتر بازیابی نهایی استفاده نشده است. همچنین m معمولاً بزرگتر از ۱ است.

مدل بهبود یافته مشابه ایزوترم جذب لانگمور است. وقتی m در معادله (۲-۵۵) برابر ۱ باشد معادله (۲-۵۶) به دست خواهد آمد. این مدل معمولاً برای فلوتاسیون با جریان مخلوط کامل صادق است.

$$R = R_{\infty} \frac{k t}{1 + k t} \quad (2-56)$$

این مدل در تحقیقات دیگری نیز ارائه شده است. همچنین، مشاهده می‌شود که این مدل مشابه مدل راکتور مخلوط کامل است در حالتی که k در این مدل برابر با $1/k$ باشد (Bull 1966).

۲-۲-۱۵- مدل با توزیع گسسته

مدل ذرات شناور شونده با سینتیک تند و کند مطابق معادله (۲-۵۷) ارائه شده است (Kelsall 1961).

$$R = (1-z)(1 - e^{-k_f t}) + z(1 - e^{-k_s t}) \quad (2-57)$$

این مدل بیش از سایر مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی منطبق می‌شود (Kelsall 1961).

مدل ذرات شناور شونده با سینتیک تند، متوسط و کند مطابق معادله (۲-۵۸) ارائه شده است

(Jowett 1960, 1961, 1974, 1980).

$$R=a_1(1-e^{-k_f t}) + a_2(1-e^{-k_m t}) + a_3(1-e^{-k_s t}) \quad (58-2)$$

که در آن:

a_1 : جزء شناور شونده تند

a_2 : جزء شناور شونده متوسط

a_3 (Z): جزء شناور شونده کند

در مدلی دیگر سینتیک ابعاد ذرات در رابطه با بازیابی در نظر گرفته شده است (Huber-Panu 1976).

$$R= R_{\infty}(1-\frac{e^{-k_l t}-e^{-k_u t}}{k_u-k_l}) \quad (59-2)$$

که در آن:

k_l : سینتیک ابعاد ریزتر

k_u : سینتیک ابعاد درشت‌تر

۲-۲-۱۶- مدل مرتبه اول کلاسیک با فاکتور اصلاح زمان صفر

در بسیاری از مقالات تحقیقات زیادی بر روی سینتیک فلوتاسیون با مد نظر قرار دادن اصلاح زمان انجام شد. طی این تحقیقات مدل مرتبه اول ارائه شده توسط کلایمپل اصلاح شده و مشابه معادله (۷۰-۲) فاکتور اصلاح زمان به آن اضافه شد (Agar 1985)، (Klimpel et al. 1979, 1980, 1981, 1988) و (Agar, 1983).

$$R=R^*(1-e^{-k(t+t^*)}) \quad (60-2)$$

که در آن t^* زمان اصلاح کننده است.

آگار^۱ و برت^۲ اعتقاد داشتند که زمانی که هوادهی شروع می‌شود زمان آغاز می‌شود ولی در اصل زمانی که کف باردار می‌شود باید زمان آغاز شود (فاکتور اصلاح زمان منفی). در برخی از موارد کانی‌های آبران در زمان هوادهی به حباب هوا می‌چسبند و زمان اصلی کمی قبل از آغاز هوادهی آغاز می‌شود (فاکتور اصلاح زمان مثبت). سپس وی نشان داد که t^* بین صفر تا ۱۰ ثانیه است (Agar, Barrett 1983).

۲-۲-۱۷- مدل مرتبه اول با ثابت سینتیک متوسط

این مدل با نام مدل چن شهرت دارد و مطابق معادلات (۲-۶۱) و (۲-۶۲) است (Zhang 1989, Chen, Wu 1978, Chen, Mular 1982).

$$\frac{dC}{dt} = -\overline{K(t)} \cdot C \quad (۲-۶۱)$$

$$\overline{K(t)} = K_0 \cdot \exp(-g \cdot t) \quad (۲-۶۲)$$

که در آن:

K_0 : نرخ متوسط در زمان شروع فلوتاسیون

g : پارامتر ثابت

$\overline{K(t)}$: تابع نرخ متوسط

در مدل اصلاح شده آن اگر خوراک شامل ذراتی با نرخ توزیع متفاوت باشند نرخ سینتیک متوسط طبق محاسبه (۲-۶۳) به دست می‌آید (Zhang 1989, Chen, Wu 1978, Chen, Mular 1982).

$$\overline{K(t)} = \frac{\int_0^{K_m} k \cdot \Phi(k, 0) \cdot \exp(-k \cdot t) \cdot dk}{\int_0^{K_m} \Phi(k, 0) \cdot \exp(-k \cdot t) \cdot dk} \quad (۲-۶۳)$$

که در آن $\Phi(k, 0)$ برابر است با نرخ توزیع سینتیک فلوتاسیون

برای بررسی بهتر مدل‌های ارائه شده تمام آنها در جدول (۲-۱) به ترتیب تاریخ ارائه به صورت مقایسه‌ای ارائه شده است.

¹ Agar

² Barrett

جدول ۱-۲- لیست مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون به ترتیب تاریخ ارائه

ردیف	نام مدل	معادله ریاضی	مرتبه سینتیک	نوع ثابت سینتیک	محققان	سال ارائه
۱	مرتبه اول کلاسیک	$R=R_{\infty}(1-e^{-kt})$	۱	منفرد	Garcia-Zuniga	۱۹۳۵
۲	مرتبه ۲	$R= R_{\infty}^2 \frac{kt}{1+R^*kt}$	۲	منفرد	Arbiter	۱۹۵۱
۳	مرتبه ۱/۵	$\varepsilon(t)=\varepsilon_{\infty}\left[1-\frac{1}{\left(\frac{1}{2}\sqrt{C_0}kt+1\right)^2}\right]$	۱/۵	منفرد	Garcia-Zuniga, Bogdanov, Morris, Horst	۱۹۵۶
۴	مرتبه صفر	$R(t)=\frac{kt}{C_0}$	صفر	منفرد	Garcia-Zuniga, Bogdanov	۱۹۵۹
۵	مرتبه ۰/۵	$R(t)=\frac{kt}{\sqrt{C_0}}-\frac{k^2t^2}{4C_0}$	۰/۵	منفرد	Bogdanov	۱۹۵۹
۶	مرتبه ۳	$\varepsilon(t)=\varepsilon_{\infty}\left[1-\frac{1}{\sqrt{1+2C_0^2kt}}\right]$	۳	منفرد	Garcia-Zuniga, Bogdanov	۱۹۵۹
۷	مرتبه ۴	$\varepsilon(t)=\varepsilon_{\infty}\left[1-\frac{1}{\sqrt[3]{1+3C_0^3kt}}\right]$	۴	منفرد	Garcia-Zuniga, Bogdanov	۱۹۵۹
۸	مرتبه ۵	$\varepsilon(t)=\varepsilon_{\infty}\left[1-\frac{1}{\sqrt[4]{1+4C_0^4kt}}\right]$	۵	منفرد	Garcia-Zuniga, Bogdanov	۱۹۵۹
۹	مرتبه ۶	$\varepsilon(t)=\varepsilon_{\infty}\left[1-\frac{1}{\sqrt[5]{1+5C_0^5kt}}\right]$	۶	منفرد	Garcia-Zuniga, Bogdanov	۱۹۵۹
۱۰	سه پارامتری ذرات شناور شونده کند و تند	$R=(1-z)(1-e^{-k_f t})+z(1-e^{-k_s t})$	۱	گسسته	Kelsall	۱۹۶۱
ردیف	نام مدل	معادله ریاضی	مرتبه سینتیک	نوع ثابت سینتیک	محققان	سال ارائه
۱۱	چهار پارامتری	$R=(R_{\infty}-z)(1-e^{-k_f t})+z(1-e^{-k_s t})$	۱	گسسته	Kelsall	۱۹۶۱

					ذرات شناور شونده کند و تند	
۱۹۶۳	Inoue, Imauzimi, Loveday, Woodburn	پیوسته	۱	$f(t) = \left(\frac{1}{1 + k_m \cdot t} \right)^{(n+1)}$	دو پارامتری مرتبه اول با توزیع گاما منفرد**	۱۲
۱۹۶۳	Inoue, Imauzimi, Loveday, Woodburn	پیوسته	۱	$f(t) = \left(\frac{a}{1+t} \right)^n + \left(\frac{1-a}{1+t} \right)^m$	دو پارامتری مرتبه اول با توزیع گاما جفت**	۱۳
۱۹۶۳	Inoue, Imauzimi, Loveday, Woodburn, Polat, Chander	پیوسته	۱	$\left(\frac{\mu + \sigma^2 t}{\mu} \right)^{\frac{\mu^2}{\sigma^2}}$	سه پارامتری مرتبه اول با توزیع گاما *	۱۴
۱۹۶۳	Inoue, Imaizumi	منفرد	۱	$R = R_{\infty} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{t}{K}} \right)$	راکتور مخلوط کامل	۱۵
۱۹۷۰	Harris, Chakravarti,	پیوسته	۱	$(1 + e^{-Kt} - 2e^{Kt/2}) / ((Kt/2)^2)$	دو پارامتری مرتبه اول با توزیع مثلثی*	۱۶
۱۹۷۰	Harris, Chakravarti, Polat, Chander	پیوسته	۱	$(e^{(wt)/2} + e^{(wt)/2} - 2) / (e^{-\mu t} (wt/2)^2)$	سه پارامتری مرتبه اول با توزیع مثلثی*	۱۷
۱۹۷۴	Jowett	گسسته	۱	$R = a_1(1 - e^{-k_f t}) + a_2(1 - e^{-k_m t}) + a_3(1 - e^{-k_s t})$	چهار پارامتری ذرات شناور شونده کند، متوسط و تند	۱۸

ردیف	نام مدل	معادله ریاضی	مرتبه سینتیک	نوع ثابت سینتیک	محققان	سال ارائه
۱۹	سه پارامتری با قابلیت فلوتاسیون برای ابعاد مختلف	$R = R_{\infty} \left(1 - \frac{e^{-k_l t} - e^{-k_u t}}{k_u - k_l} \right)$	۱	گسسته	Huber-Panu	۱۹۷۶
۲۰	دو پارامتری مرتبه اول با توزیع مستطیلی *	$(1 - e^{-K t}) / K t$	۱	پیوسته	Huber-Panu, Klimpel	۱۹۷۶
۲۱	سه پارامتری مرتبه اول با توزیع مستطیلی *	$(e^{-\mu t + (wt)/2} - e^{-\mu t(wt)/2}) / wt$	۱	پیوسته	Huber-Panu, Klimpel, Polat, Chander	۱۹۷۶
۲۲	مرتبه اول با ثابت سینتیک متوسط	$\frac{dC}{dt} = -\overline{K(t)} \cdot C$	۱	متوسط	Chen, Wu, Mular	۱۹۷۸
۲۳	مرتبه اول کلاسیک با فاکتور اصلاح زمان صفر	$R = R_{\infty} (1 - e^{-k(t+t^*)})$	۱	منفرد	Agar	۱۹۸۳
۲۴	مرتبه اول دو مرحله‌ای	$R = R_{\infty} \left(\frac{k}{k - k^*} (1 - e^{-k^* t}) - \frac{k^*}{k - k^*} (1 - e^{-k t}) \right)$	۱	گسسته	Meyer, Klimpel	۱۹۸۴
۲۵	جذب جامد/گاز	$R = \frac{k t}{(1 + k t)^m}$	۱	منفرد	Meyer, Klimpel	۱۹۸۴
۲۶	جذب جامد/گاز بهبود یافته	$R = R_{\infty} \frac{k t}{1 + k t}$	۱	منفرد	Meyer, Klimpel, Bull	۱۹۸۴

ردیف	نام مدل	معادله ریاضی	مرتبه سینتیک	نوع ثابت سینتیک	محققان	سال ارائه
۲۷	با توزیع گاما اصلاح شده	$R_c(t) = 1 - \int_0^{k_m} M \cdot \exp(-k + k \cdot t) k^{(m-1)} \cdot dk$	۱	پیوسته	Zhang	۱۹۸۹
۲۸	با ثابت سینتیک با توزیع گسسته اصلاح شده	$R(t) = \sum_{i=1}^n R_{i0} \cdot \exp(-K_i \cdot t)$	۱	گسسته	Zhang	۱۹۸۹
۲۹	مرتبه اول با ثابت سینتیک متوسط اصلاح شده	$R_c(t) = R_0(1 - (1 + g' \cdot t)^{(-K_0'g')})$	۱	متوسط	Zhang, Chen, Wu, Mular	۱۹۸۹
۳۰	مرتبه دوم با توزیع مستطیلی	$R = R_{\infty}(1 - \frac{\ln(1+kt)}{kt})$	۲	پیوسته	Ek	۱۹۹۱
۳۱	مرتبه اول برگشت پذیر	$R = R_{\infty} \frac{k}{k+k_-} (1 - e^{-(k+k_-)t})$	۱	گسسته	Ek	۱۹۹۱
۳۲	دو پارامتری مرتبه اول با توزیع سینوسی *	$(1 - (2Kt/\pi)e^{-Kt}) / (1 + (2Kt/\pi))^2$	۱	پیوسته	Diao, Fuerstenau, Hanson	۱۹۹۲
۳۳	سه پارامتری مرتبه اول با توزیع سینوسی *	$(e^{-\mu t + (2wt)/(3)} - (2wt)/(\pi)) e^{-\mu t(2wt)/(6)} / (1 + (2wt/\pi)^2)$	۱	پیوسته	Diao, Fuerstenau, Hanson, Polat, Chander	۱۹۹۲
۳۴	دو پارامتری مرتبه اول با توزیع نرمال *	$\frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\mu t + 3}{\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\mu t - 3}{\sqrt{2}}\right)}{2e^{\mu t - \frac{\mu^2 t^2}{18}}}$	۱	پیوسته	Loveday, Ferreira	۲۰۰۰

ردیف	نام مدل	معادله ریاضی	مرتبه سینتیک	نوع ثابت سینتیک	محققان	سال ارائه
۳۵	سه پارامتری مرتبه اول با توزیع نرمال *	$\frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\sigma t + \frac{\mu}{\sigma}}{\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma t - \frac{\mu}{\sigma}}{\sqrt{2}}\right)}{2e^{\mu t \frac{\sigma^2 t^2}{2}}}$	۱	پیوسته	Loveday, Ferreira	۲۰۰۰

* معادله ریاضی در این ردیف‌ها برابر $1-R(t)/R_{\infty}$ می‌باشد.

** معادله ریاضی در این ردیف‌ها برابر $f(k)$ می‌باشد.

همانطور که ملاحظه می‌شود، مهمترین تفاوت‌هایی که در مدل‌های مختلف به چشم می‌خورند به

شرح زیر هستند:

- مرتبه فلوتاسیون که بر اساس نظریات و مدل‌های مختلف شامل صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ می‌باشد که اغلب به صورت مرتبه یک به کار گرفته شده است.
- ثابت ماندن یا تغییر مرتبه فلوتاسیون در طول زمان فلوتاسیون که بر اساس برخی نظریات و تحقیقات مرتبه فلوتاسیون در طول زمان کف‌گیری از صفر شروع و تا ۶ ادامه می‌یابد.
- نوع ثابت سینتیک که بر اساس نتایج به دست آمده می‌تواند ثابت یا متغیر باشد.
- انواع نرخ ثابت سینتیک که شامل پیوسته، گسسته و متوسط است.
- حضور و عدم حضور بازیابی بی‌نهایت در مدل‌های مختلف
- تعداد پارامترها در مدل‌های سینتیکی مختلف
- نوع مدل‌های سینتیکی پیوسته مانند توزیع‌های سینوسی، مربعی، گاما، مثلثی، نرمال و ...
- و در نهایت اینکه برخی محققان مدل‌های قبلی را با کمی اصلاحات دوباره ارائه کرده‌اند.

۲-۳- بررسی پارامترهای مختلف بر سینتیک فلوتاسیون

تعدادی از محققان تأثیر پارامترهای مختلف فلوتاسیون را بر سینتیک فرآیند بررسی کردند که مهمترین آنها در ادامه ارائه شده است.

۲-۳-۱- تأثیر ابعاد ذرات

در سال ۱۹۴۲ گادین^۱ و همکارانش تحقیقات زیادی را بر روی تأثیر ابعاد ذرات بر سینتیک فلوتاسیون انجام دادند. آنها تلاش‌های زیادی کردند تا یک رابطه بین سینتیک فلوتاسیون و ابعاد ذرات پیدا کنند (Goudin 1942)

در سال ۱۹۵۲، موریس^۲ نشان داد که بیشترین سینتیک فلوتاسیون در ابعاد متوسط به دست می‌آید. همچنین او در زمینه رابطه بین کاهش ابعاد و کاهش سینتیک فلوتاسیون تحقیقات بسیاری انجام داد. آنها نشان دادند که با افزایش و کاهش بیش از حد اندازه ذرات سینتیک فلوتاسیون کاهش می‌یابد (Morris 1952).

محققانی چون کلایمپل^۳ و هانسن^۴ در سال ۱۹۸۱ نشان دادند که با کاهش ابعاد ذرات سینتیک فلوتاسیون و R_{∞} زیاد می‌شود ولی با افزایش بیش از حد آن بازیابی کاهش خواهد یافت.

۲-۳-۲- تأثیر نرخ هوادهی

در مقالاتی لاپلانت^۵ و همکارانش در دهه ۱۹۸۰ تحقیقات زیادی در مقیاس آزمایشگاهی بر روی تأثیر نرخ جریان هوا و غلظت کف‌ساز بر ابعاد حباب و سینتیک فلوتاسیون انجام دادند. آنها نشان دادند که

¹ Goudin

² Morris

³ Klimpel

⁴ Hansen

⁵ Laplante

سینتیک فلوتاسیون با افزایش هوادهی، افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که در نرخ هوادهی متوسط بیشترین قابلیت انتخابی بودن رخ می‌دهد (Laplane 1980).

۲-۳-۳- تأثیر ابعاد حباب

آزمایش‌های زیادی توسط احمد^۱ و جیمسون^۲ در سال ۱۹۸۵ در مورد بررسی تأثیر ابعاد حباب انجام شد. آنها نشان دادند که با کاهش ابعاد حباب، نرخ فلوتاسیون ذرات به شدت افزایش می‌یابد. در ذرات سبک، افزایش سرعت همزنی باعث افزایش نرخ فلوتاسیون می‌شود و در ذرات سنگین بهترین نتایج با حباب‌هایی ریز و نرخ همزنی حداقل (تا حدی که فقط ذرات معلق شوند) به دست می‌آید. در ابعاد کوچکتر از ۴۰ میکرون، ابعاد ذرات و آشفستگی عامل اصلی است و در ابعاد ۷۵ تا ۱۴۲ میکرون، ابعاد حباب عامل ناچیزی است. آشفستگی سرعت حباب و ذرات را نسبت به سیال زیاد می‌کند و به دنبال آن احتمال برخورد را افزایش می‌دهد. همچنین نشان دادند که ابعاد حباب و آشفستگی با انرژی پراکندگی رابطه عکس دارند. به طوری که با ۱۰۰ برابر شدن انرژی پراکندگی ابعاد حباب تنها دو برابر کاهش خواهد یافت. در نهایت نشان دادند که تأثیر آشفستگی بر احتمال برخورد خیلی بیشتر از ابعاد حباب است (Klimpel 1980).

۲-۳-۴- تأثیر مواد شیمیایی

مواد شیمیایی بیشتر از سایر پارامترها توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته که این می‌تواند به دلیل کنترل آسان آن باشد. بیشتر این تحقیقات توسط کلایمپل^۳ در دهه ۱۹۸۰ تحقیقات زیادی را در این زمینه انجام داد. وی با شبیه سازی k و R_{∞} سعی بر انتخاب بهترین کلکتور و مواد شیمیایی داشت (Klimpel 1980). تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که در ادامه ارائه شده است.

^۱ Ahmed

^۲ Jameson

^۳ Klimpel

۲-۳-۵- سینتیک فلوتاسیون و مدل سازی

مدل سازی بر سینتیک فلوتاسیون استوار است. با کمک سینتیک فلوتاسیون زمان بهینه فلوتاسیون تعیین می شود (Agar 1985). در تحقیقاتی دیگر، یک ضریب برای بزرگ مقیاس کردن نتایج آزمایشگاهی به صنعتی ارائه شده است (Kalapudas 1985).

با توجه به اهمیت فلوتاسیون در فرآوری مواد معدنی و مدل سازی، فواید توسعه مدل و تعیین ثابت سینتیکی به شرح زیر است:

- پیش بینی مقدار بازیابی در زمان های مختلف بدون انجام آزمایش های اضافه
- کاهش زمان و هزینه ها
- پیش بینی تغییرات شرایط بر نتایج
- تعیین زمان ماند
- طراحی مدار
- کنترل سیستم
- آموزش کارکنان
- بهینه سازی نرخ مواد شیمیایی

در جدول (۲-۲) بطور خلاصه، تحقیقات عمده بر سینتیک فلوتاسیون ارائه شده است.

جدول ۲-۲- خلاصه ای از مطالعات انجام شده پیشین درباره سینتیک فلوتاسیون

ردیف	موضوع تحقیق	محققان	بررسی پارامترها	مدل های مورد بررسی	کانی های هدف	تاریخ انجام تحقیق
۱	بازیابی فلوتاسیون به عنوان تابعی نمایی از زمان	Garcia-Zuniga	-	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول جذب جامد/گاز بهبود یافته	-	۱۹۳۵
۲	کاربرد احتمال در ارزیابی سیستم فلوتاسیون	Kelsall	-	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول جذب جامد/گاز بهبود یافته	-	۱۹۶۱
۳	شبیه سازی کارخانه های فلوتاسیون	Loveday Marchant	ابعاد ذرات	مدل مرتبۀ اول با توزیع گاما	آهن مس مولیبدن	۱۹۷۲

ردیف	موضوع تحقیق	محققان	بررسی پارامترها	مدل های مورد بررسی	کانی های هدف	تاریخ انجام تحقیق
۴	بررسی تأثیر مواد شیمیایی بر سینتیک فلوتاسیون مس سولفیدی	Klimpel Hansen	ابعاد ذرات مقدار و نوع کلکتور مقدار و نوع کف ساز pH	مرتبه اول با توزیع مستطیلی	مس سولفیدی	۱۹۸۱
۵	استفاده از داده های نرخ فلوتاسیون برای ارزیابی عوامل شیمیایی	Agar Barrett	مقدار فعال کننده نوع و میزان بازداشت کننده	مرتبه اول کلاسیک با فاکتور اصلاح زمان صفر	سولفیدهای مس سولفیدهای نیکل شیلیت	۱۹۸۳
۶	تفاوت مدل ها در فلوتاسیون مس پورفیری	Dowling, et.al	ابعاد ذرات مقدار و نوع کلکتور مقدار و نوع کف ساز	مرتبه اول کلاسیک مدل مرتبه اول با توزیع مستطیلی مدل راکتور مخلوط کامل مدل جذب گاز/جامد مدل جذب گاز/جامد بهبود یافته مدل مرتبه دوم مدل مرتبه دوم با توزیع مستطیلی مدل ۳ پارامتری ذرات شناور شونده کند و تند مدل ۴ پارامتری ذرات شناور شونده کند و تند مدل مرتبه اول کلاسیک با فاکتور اصلاح زمان مدل مرتبه اول دو مرحله ای مدل مرتبه اول برگشت پذیر	مس پورفیری	۱۹۸۵
۷	فاکتورهای تأثیرگذار بر سینتیک فلوتاسیون	Zhang	هوادهی سرعت ایمپلر	مدل با توزیع گاما اصلاح شده مدل با توزیع گسسته اصلاح شده مدل با سینتیک ثابت متوسط اصلاح شده	مس روی آهن	۱۹۸۹
۸	سینتیک فلوتاسیون- تنوری و مدل آزمایش ها	Radoev Alexandrova	ابعاد ذرات	مرتبه اول کلاسیک	بالوتینی	۱۹۹۲
۹	نقش سینتیک در کنترل و مدل سازی کارخانه های فلوتاسیون	Niemi	ابعاد ذرات درجه جذب شیمیایی	مرتبه اول کلاسیک	کالکوپیریت	۱۹۹۵
۱۰	نرخ فلوتاسیون سلسیت و کلسیت	Hernainz Calero	ابعاد ذرات میزان کلکتور	مرتبه اول کلاسیک مرتبه دوم	سلسیت کلسیت	۱۹۹۵

ردیف	موضوع تحقیق	محققان	بررسی پارامترها	مدل های مورد بررسی	کانی های هدف	تاریخ انجام تحقیق
۱۱	مدل سینتیکی برای فلوتاسیون زغال	Susko Stanley	ابعاد ذرات	مدل مرتبه اول کلاسیک	زغال	۱۹۹۵
۱۲	تفسیر آماری سینتیکی برای شناورسازی کانی های سولفیدی پیچیده	Yuan, et.al	نوع گاز هوادهی	مرتبه اول کلاسیک مدل مرتبه اول با توزیع مستطیلی مدل راکتور مخلوط کامل مدل جذب گاز/جامد بهبود یافته مدل مرتبه دوم مدل مرتبه دوم با توزیع مستطیلی	مس سرب نقره	۱۹۹۶
۱۳	ثابت نرخ فلوتاسیون و اندیس انتخابی	Xu	نرخ هوادهی نوع و مقدار کف ساز	مرتبه اول کلاسیک با فاکتور اصلاح زمان	کالکوپیریت پنتلانتیت پیروترین	۱۹۹۷
۱۴	فلوتاسیون: مدل های سینتیکی با مقایسه مواد شیمیایی	Hernainz Calero	ابعاد ذرات میزان کلکتور	مرتبه اول کلاسیک مرتبه دوم	سلستیت کلسیت	۲۰۰۰
۱۵	ارزیابی مدل های سینتیکی مرتبه اول فلوتاسیون با ثابت نرخ توزیع پیوسته	Polat Chander	ابعاد ذرات مقدار کلکتور	مدل اول کلاسیک دو و سه پارامتری با توزیع مثلثی دو و سه پارامتری با توزیع مستطیلی دو و سه پارامتری با توزیع سینوسی دو و سه پارامتری با توزیع گاما دو و سه پارامتری با توزیع نرمال	زغال سنگ	۲۰۰۰
۱۶	سینتیک فلوتاسیون پیروکلر	Oliveira, et.al	میزان کلکتور میزان فعال کننده	مرتبه اول کلاسیک مرتبه اول با توزیع مستطیلی مدل ۴ پارامتری ذرات شناور شونده کند و تند	پیروکلر	۲۰۰۱
۱۷	انتخاب مواد شیمیایی فلوتاسیون با آزمایش های فلوتاسیون ناپیوسته	Thompson	میزان کف ساز میزان کلکتور	مرتبه اول کلاسیک	کمپلکس سولفیدی	۲۰۰۲
۱۸	تعیین ظرفیت حمل جامد و ثابت سینتیکی مرتبه اول برای مولیبدنیت با استفاده از ستون فلوتاسیون نیمه صنعتی	وزیری و همکاران	سرعت ظاهری آب بایاس غلظت سولفور عمق کف سرعت ظاهری گاز	مرتبه اول کلاسیک	مس مولیبدن	۲۰۰۳
۱۹	آنالیز مدل های سینتیکی فلوتاسیون ناپیوسته	Brozek Mlynarczykowska	-	مدل مرتبه صفر تا ۶	-	۲۰۰۷

ردیف	موضوع تحقیق	محققان	بررسی پارامترها	مدل های مورد بررسی	کانی های هدف	تاریخ انجام تحقیق
۲۰	بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر سینتیک فلوتاسیون فسفات	Al-Thyabat	مقدار کلکتور ابعاد ذرات دور همزن	مدل مرتبه اول کلاسیک	فسفات	۲۰۰۹
۲۱	بررسی تأثیر ساختار مولکولی کلکتورها بر سینتیک فلوتاسیون	Natarajan Nirdosh	نوع کلکتور	مرتبه اول کلاسیک با پارامتر اصلاح زمان صفر	کالکوپیریت پنتلاتیت	۲۰۰۹
۲۲	مطالعه بر روی کارایی مدل های مرتبه دوم و مدل های دو فازی در فلوتاسیون کانی آهن	Saleh	مقدار کلکتور	مرتبه اول کلاسیک مرتبه اول با توزیع مستطیلی مرتبه اول برگشت پذیر مرتبه دوم مرتبه دوم با توزیع مستطیلی مدل ۳ پارامتری ذرات شناور شونده کند و تند مدل ۳ پارامتری با توزیع گاما	آهن	۲۰۱۰
۲۳	بررسی ابعاد ذرات بر سینتیک فلوتاسیون با کمک روش رگرسیون چند متغیره	Kor, et.al	ابعاد ذرات	مرتبه اول کلاسیک	زغال سنگ	۲۰۱۰
۲۴	بررسی تأثیر ابعاد ذرات زغال بر سینتیک و بازیابی	آبخوشک و همکاران	ابعاد ذرات	مدل مرتبه اول کلاسیک	زغال سنگ	۲۰۱۰
۲۵	بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر سینتیک فلوتاسیون کانی های سولفیدی مس	شاهچراغی	مقدار کلکتور مقدار کف ساز pH زمان آماده سازی	مدل مرتبه اول کلاسیک	سولفیدهای مس	۲۰۱۱
۲۶	سینتیک فلوتاسیون طلای پیریتی	Yalcin Kelebek	ابعاد ذرات	مرتبه اول کلاسیک مرتبه دوم	طلای پیریتی	۲۰۱۱
۲۷	حذف پارافین از آب- تأثیر ابعاد حباب و ذرات بر سینتیک فلوتاسیون	Mohammed	ابعاد ذرات ابعاد حباب تأثیر کلرید سدیم	مرتبه اول کلاسیک	پارافین	۲۰۱۳
۲۸	مدل سازی سینتیکی با کمک نرم افزار متلب	Krstev, et.al	-	مرتبه اول کلاسیک	مس سولفیدی	۲۰۱۳

ردیف	موضوع تحقیق	محققان	بررسی پارامترها	مدل های مورد بررسی	کانی های هدف	تاریخ انجام تحقیق
۲۹	تأثیر ابعاد ذرات بر فلوتاسیون معکوس زغال	Zhang, et.al	ابعاد ذرات	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مدل مخلوط کامل مدل جذب گاز/جامد اصلاح شده مدل مرتبۀ دوم مدل مرتبۀ دوم با توزیع مستطیلی	زغال سنگ	۲۰۱۳
۳۰	مدل های توزیع شده سینتیک فلوتاسیون - یافته های کاربردی جدید برای فلوتاسیون زغال	Ofori, et.al	ابعاد ذرات نوع ماسرال ها	مرتبۀ اول کلاسیک	زغال سنگ	۲۰۱۴
۳۱	بررسی سینتیکی فلوتاسیون کارخانه زغالشویی طبس	آقای دهقانی	-	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی ذرات با قابلیت شناوری تند و کند ذرات با قابلیت شناوری تند و کند اصلاح شده مرتبۀ اول با توزیع گاما مدل اختلاط کامل	زغال سنگ	۲۰۱۴
۳۲	بررسی مدل های سینتیکی مرتبۀ اول نمونه های سولفید مس سرچشمه	عزیزی و همکاران	مقدار کلکتور درصد جامد pH	مدل مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مدل ذرات شناور شونده تند و کند مدل مخلوط کامل	سولفیدهای مس	۲۰۱۵
۳۳	سینتیک فلوتاسیون ناپیوسته - روش حساب دیفرانسیل و انتگرال	Vinnet, et.al	-	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مرتبۀ اول با توزیع گاما	مس مولیبدن	۲۰۱۵
۳۴	بررسی مدل فلوتاسیون زغال در ابعاد مختلف	Ningbo et.al	نرخ هوادهی ابعاد ذرات	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مرتبۀ دوم با توزیع مستطیلی مرتبۀ دوم مرتبۀ اول گسسته	زغال	۲۰۱۷
۳۵	فلوتاسیون وولفرامیت و بررسی مدل فلوتاسیون	Guanghua et.al	ابعاد ذرات	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مرتبۀ اول با توزیع نمایی مدل مرتبۀ اول با توزیع گسسته	وولفرامیت	۲۰۱۷

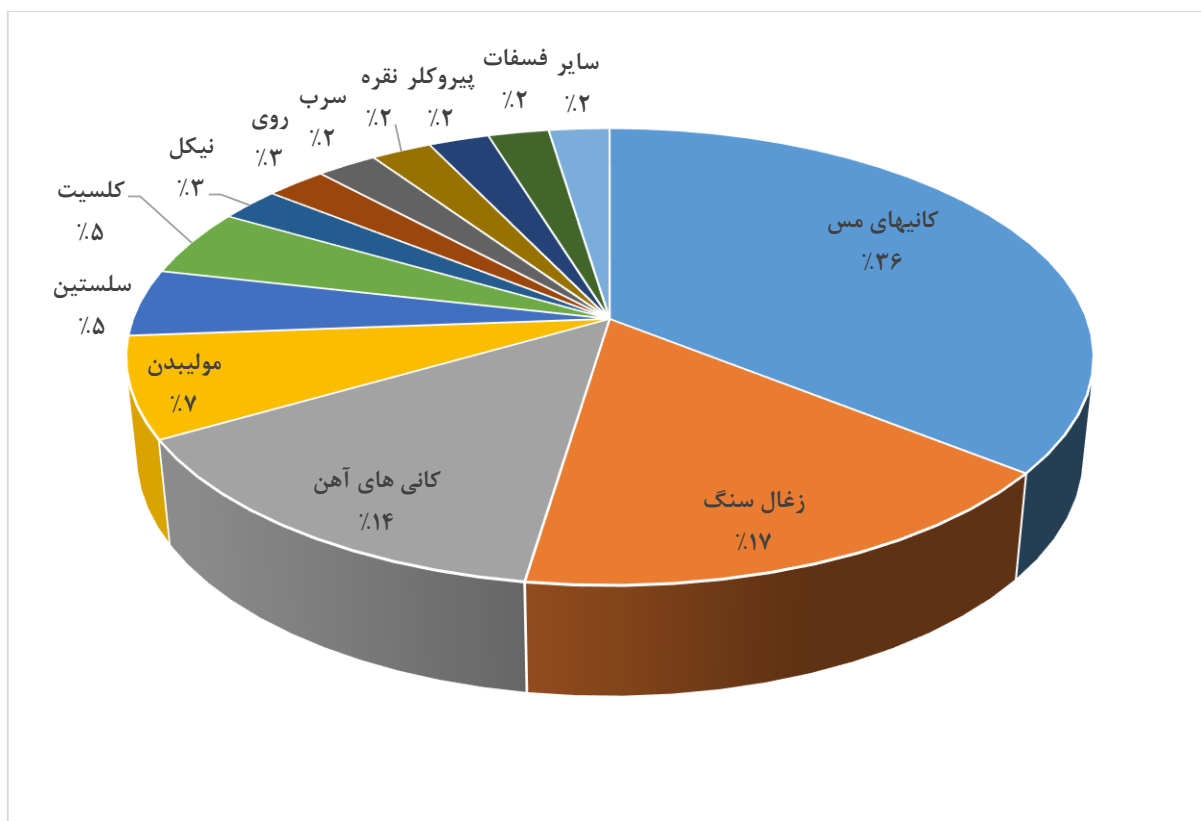
ردیف	موضوع تحقیق	محققان	بررسی پارامترها	مدل های مورد بررسی	کانی های هدف	تاریخ انجام تحقیق
۳۶	مروری بر مدل های سینتیکی فلوتاسیون	Xiangning et.al	-	مرتبه اول کلاسیک مرتبه اول با توزیع مستطیلی ذرات شناور شونده تند و کند ذرات شناور شونده تند، متوسط و کند مخلوط کامل مرتبه اول با توزیع گاما مرتبه اول با توزیع مثلثی مرتبه اول با توزیع نمایی مرتبه اول با توزیع سینوسی مرتبه اول برگشت پذیر مرتبه اول دو مرحله ای مرتبه اول جذب جامد و گاز مرتبه دوم با توزیع مستطیلی مرتبه دوم مرتبه اول با نرخ متوسط	-	۲۰۱۷
۳۷	بررسی سینتیکی جذب و وا جذب بر کانی های مختلف	Safari Deglon	مقدار کلکتور درصد جامد ابعاد ذرات ابعاد حباب	مرتبه اول برگشت پذیر	گالن پیریت پنتلاتیت آپاتیت هماتیت کوارتز	۲۰۱۸
۳۸	بررسی سینتیک کانی های سولفور و گانگ بر فلوتاسیون	Amelunex et.al	-	مرتبه اول مرحله ای	مس سولفوری مولیبدن	۲۰۱۸
۳۹	بهبود فلوتاسیون با استفاده از NaCl قبل از سولفوراسیون	Liu et.al	نوع مواد شیمیایی	-	سروریت	۲۰۱۸
۴۰	بررسی شکل ذرات در سینتیک شناور سازی زغال	Ma et.al	شکل ذرات	مرتبه اول کلاسیک مرتبه اول با توزیع مستطیلی مرتبه دوم مرتبه دوم با توزیع مستطیلی مخلوط کامل مرتبه اول جذب جامد و گاز	زغال	۲۰۱۸

ردیف	موضوع تحقیق	محققان	بررسی پارامترها	مدل های مورد بررسی	کانی های هدف	تاریخ انجام تحقیق
۴۱	بررسی تأثیر میزان نرمه بر سینتیک زغال	Ni et.al	درصد نرمه	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مرتبۀ دوم مرتبۀ دوم با توزیع مستطیلی مخلوط کامل مرتبۀ اول جذب جامد و گاز	زغال	۲۰۱۸
۴۲	بررسی ابعاد ذرات بر سینتیک فلوتاسیون کالکوپریت	Dos Santos Galery	ابعاد ذرات	مرتبۀ اول کلاسیک	کالکوپریت	۲۰۱۸
۴۳	بررسی سینتیکی فلوتاسیون انواع مختلف زغال	Zhou et.al	مقدار مواد شیمیایی	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مرتبۀ دوم مرتبۀ دوم با توزیع مستطیلی مخلوط کامل مرتبۀ اول جذب جامد و گاز	زغال	۲۰۱۹
۴۴	بررسی سینتیکی فلوتاسیون با تغییر ابعاد ذرات و حباب	Zhou et.al	ابعاد حباب ابعاد ذرات	مرتبۀ اول کلاسیک	پیریت	۲۰۱۹
۴۵	بررسی سینتیکی فلوتاسیون با تغییر نرخ و نوع مواد شیمیایی	Bahrami et.al	تغییر نوع و نرخ مواد شیمیایی	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مرتبۀ دوم مرتبۀ دوم با توزیع مستطیلی مخلوط کامل	ژیلسونیت	۲۰۱۹
۴۶	بررسی نوع حباب در سینتیک فلوتاسیون زغال	Songjiang et.al	تغییر بر نوع حباب	مرتبۀ اول کلاسیک مرتبۀ اول با توزیع مستطیلی مرتبۀ دوم مرتبۀ دوم با توزیع مستطیلی مخلوط کامل مرتبۀ اول جذب جامد و گاز	زغال	۲۰۱۹
۴۷	بررسی نرخ فلوتاسیون مس سولفیدی	Vinnett et.al	-	مدل با توزیع گاما	کالکوپریت	۲۰۱۹

۲-۳-۶- نقد و بررسی تحقیقات پیشین

تحقیقات انجام شده قبلی بیشتر بر روی پارامترهای عملیاتی فلوتاسیون متمرکز بودند و مرتبه سینتیک، ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین، در بعضی تحقیقات، تنها تأثیر متغیرها بر ثابت نرخ فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است و در اغلب تحقیقات مقدار ثابتی برای نرخ فلوتاسیون (k) در نظر گرفته شده است به طوری که پس از انجام مطالعات و آزمایش‌ها برای یک نمونه، یک مقدار k تعیین می‌شود. ولی مشخص است که k با پارامترهای عملیاتی، تجهیزاتی، شیمیایی و کانی‌شناسی تغییر می‌کند. بنابراین به دست آوردن یک رابطه ریاضی بین k و پارامترهای مختلف مؤثر بر فلوتاسیون ضروری است. در حال حاضر برای تعیین ثابت سینتیک باید با انجام آزمایش‌های سینتیکی شیب منحنی را در نقاط مختلف اندازه‌گیری کرد تا مقدار k را به دست آورد. در صورت وجود یک رابطه ریاضی بدون نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتر می‌توان نرخ فلوتاسیون را پیش‌بینی کرد. همچنین در مطالعات قبلی صورت گرفته، مدل‌سازی بیشتر بر روی مس و زغال‌سنگ (شکل ۱-۲) انجام گرفته و در مورد سینتیک کانی‌های سرب مخصوصاً تحقیقی انجام نشده است. از این رو در این رساله برای امکان دستیابی به یک یا چند مدل ریاضی برای تعیین نرخ ثابت فلوتاسیون و سایر پارامترهای مؤثر بر فلوتاسیون متمرکز شده است و به دلیل عدم انجام مدل‌سازی سینتیکی بر روی کانی کربناته سرب، این کانی به عنوان خوراک فلوتاسیون انتخاب شده است.

تحقیقات زیادی تاکنون بر روی سینتیک فلوتاسیون صورت گرفته اما با توجه به پراکندگی مطالب و عدم طبقه‌بندی مناسب، کمتر به طور مقایسه‌ای و یکپارچه به آن توجه شده است. در این تحقیق همچنین سعی شده تا با جمع‌آوری تمامی مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون ارائه شده و طبقه‌بندی آنها به یادگیری و مقایسه هر چه بهتر آنها کمک شود.



شکل ۲-۱- نمودار درصد مدل سازی های صورت گرفته بر روی کانی ها و عناصر مختلف تاکنون

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱- معرفی معدن چاه‌گز

منطقه معدنی چاه‌گز در ۶۵ کیلومتری جنوب غربی شهر بابک جای گرفته است. راه دسترسی به این منطقه از دو راهی سرچشمه در ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر بابک در جاده آسفalte شهر بابک - سیرجان ممکن است (شکل ۳-۱)



شکل ۳-۱- موقعیت جغرافیایی معدن سرب چاه‌گز

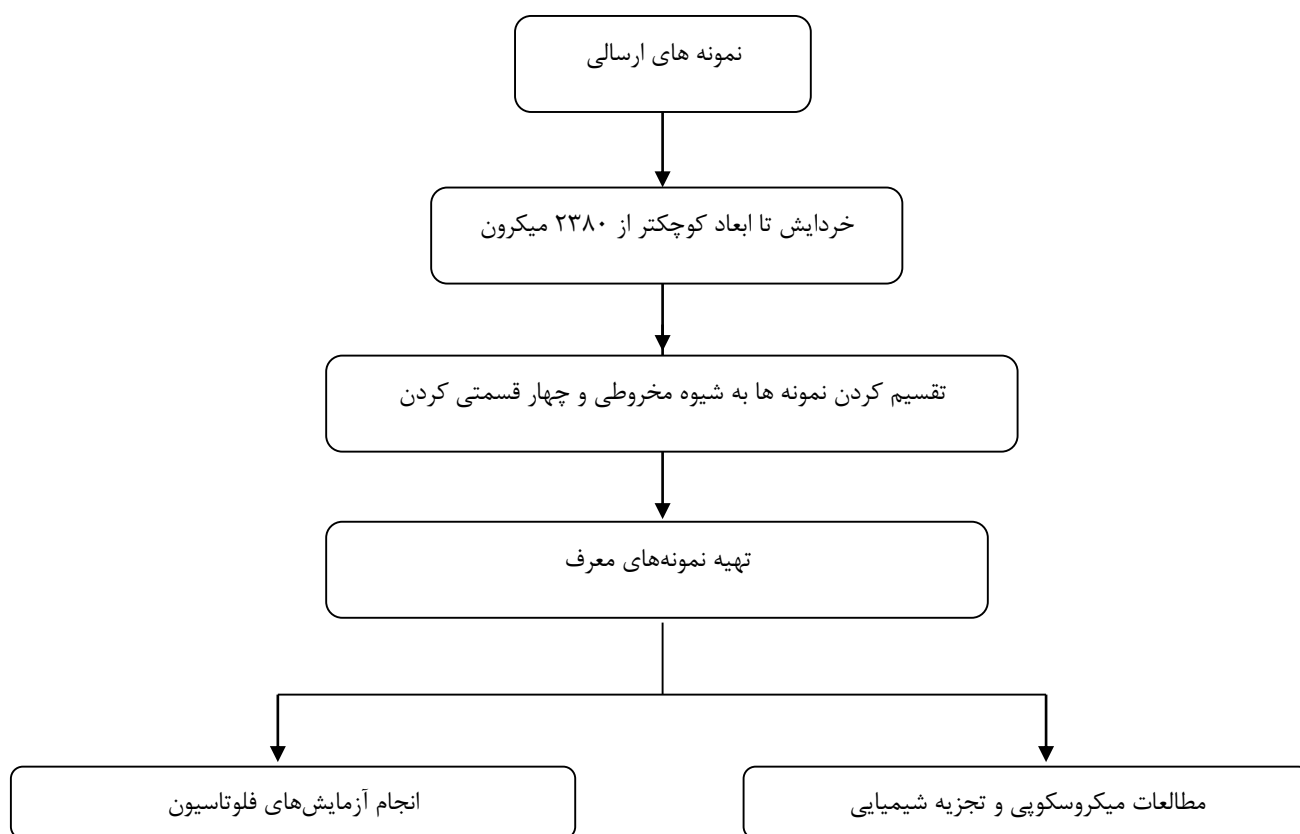
در محدوده کانسار ۲۰۰۰۰ تن سرباره‌های قدیمی انباشته شده که حاوی سرزیت هستند. نمونه‌هایی که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته از این باطله‌ها تهیه شده است.

این منطقه معدنی در کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان یا اسفندقه - ارومیه یا مریوان - منوجان و در نزدیکی زون ولکانیکی ارومیه- دختر جای دارد. زون سنندج - سیرجان روند ساختاری موازی با زاگرس دارد. در حالی که روند ساختاری منطقه معدنی ناگهان در جهت N70E و سپس بطور کامل شمالی - جنوبی می‌شود. این تغییر به خطواره‌های پی‌سنگ وابسته است که دوباره پویا شده‌اند. برخورد این خطواره‌ها به هم از دیدگاه ماگماتیسم و کانی‌سازی سرنوشت ساز است. کانی‌سازی سرب معدن چاه‌گز بطور یقین هیدروترمال است و در فرآیند رخدادهای تکتونیکی دوران سوم پدید آمده است. خاستگاه سیالات به

ماگمای کوارتز مونزونیتی نسبت داده شده است. به ویژه آنکه آنومالی‌های ژئوفیزیکی بدست آمده نیز در کنار یا نزدیکی توده‌های کوارتز مونزونیتی هستند (قربانی ۱۳۷۹).

۳-۲- نمونه‌برداری، خردایش و تقسیم نمونه‌ها

حدود ۱۰۰ کیلوگرم نمونه مورد استفاده در این تحقیق قبلاً توسط سایر محققین از باطله‌های قدیمی معدن تهیه و به آزمایشگاه شرکت کیان معدن پارس منتقل شده‌اند. نمونه‌ها به منظور همگن‌سازی و تهیه نمونه‌های مناسب برای انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی به شیوه مخروطی و چهار قسمتی کردن تقسیم شده و نمونه‌های حدوداً یک کیلوگرمی حاصل گردید. در شکل (۳-۲) شمای مراحل تقسیم و آماده‌سازی نمونه‌ها ارائه شده است.



شکل ۳-۲- شمای مراحل آماده سازی نمونه های ارسالی

۳-۳- شناخت نمونه

برای بررسی بهتر بر روی نمونه مورد نظر، مطالعات و آنالیزهای اولیه صورت گرفت که در ادامه ارائه شده است.

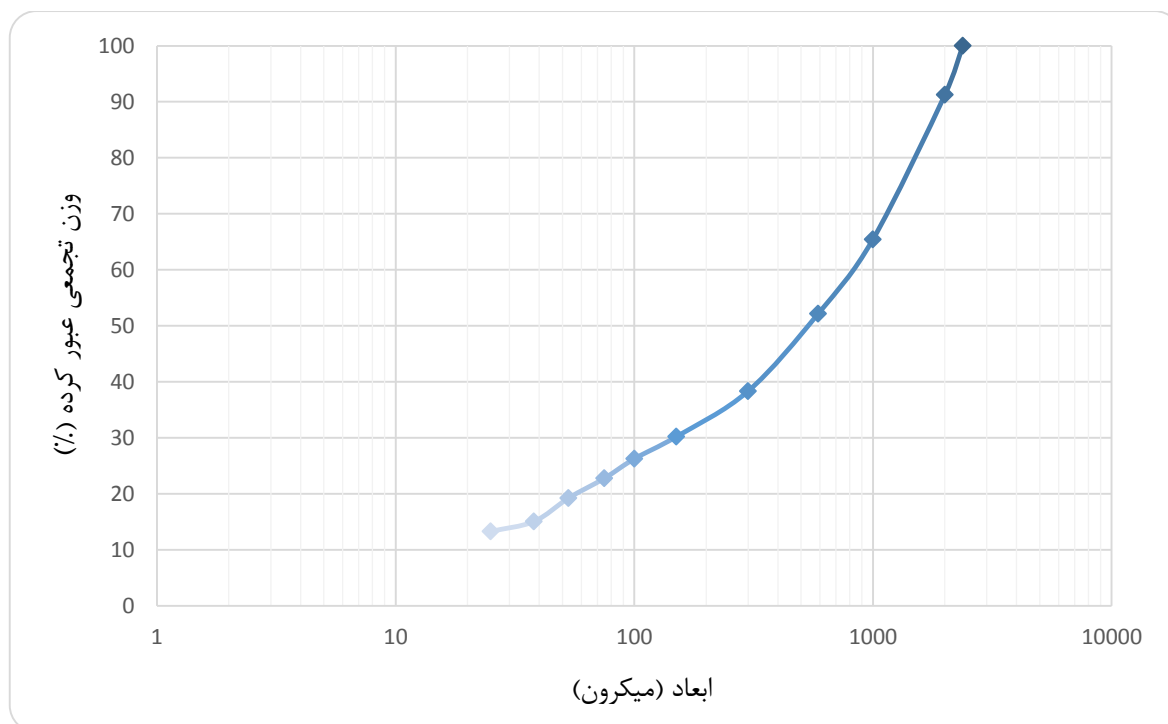
۳-۳-۱- دانه بندی و آنالیز شیمیایی

نمونه‌های معرف پس از خردایش توسط سنگ شکن غلتکی تا ابعاد کوچکتر از ۲۳۸۰ میکرون، با استفاده از سرندهای آزمایشگاهی به منظور تهیه منحنی دانه بندی مورد تجزیه سرندی قرار گرفت. در جدول (۳-۱) نتایج تجزیه سرندی نمونه‌ها و در شکل (۳-۳) منحنی دانه بندی مربوطه آورده شده است.

جدول ۳-۱- نتایج تجزیه سرندی، عیار و توزیع سرب در هر یک از بخش‌های دانه بندی

ابعاد (میکرون)	وزن (%)	وزن تجمعی (%)		عیار سرب (%)	توزیع سرب (%)
		عبور کرده	باقیمانده		
۲۳۸۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	-	-
۲۰۰۰	۸/۷۳	۸/۷۳	۹۱/۲۷	۴/۵	۵/۹۶
۱۰۰۰	۲۵/۸۳	۳۴/۵۶	۶۵/۴۴	۵/۵۷	۲۱/۸۳
۵۹۰	۱۳/۲۷	۴۷/۸۳	۵۲/۱۷	۷/۵۸	۱۵/۲۶
۳۰۰	۱۳/۸۶	۶۱/۶۹	۳۸/۳۱	۱۰/۴	۲۱/۸۷
۱۵۰	۸/۰۸	۶۹/۷۷	۳۰/۲۳	۴/۸۶	۵/۹۶
۱۰۰	۳/۹۶	۷۳/۷۳	۲۶/۲۷	۴/۷۲	۲/۸۳
۷۵	۳/۵۱	۷۷/۲۴	۲۲/۷۶	۵/۱	۲/۷۲
۵۳	۳/۵۳	۸۰/۷۸	۱۹/۲۲	۷/۸۳	۴/۲۰
۳۸	۴/۱۷	۸۴/۹۴	۱۵/۰۶	۸/۸۹	۵/۶۳
۲۵	۱/۷۸	۸۶/۷۳	۱۳/۲۷	۸/۵۲	۲/۳۱
-۲۵	۱۳/۲۷	۱۰۰/۰۰	۰/۰۰	۵/۶۷	۱۱/۴۲
مجموع/ میانگین	۱۰۰/۰۰	-	-	۶/۵۹	۱۰۰/۰۰

با توجه به منحنی رسم شده d_{80} نمونه ۱۵۶۴ میکرون است.



شکل ۳-۲- منحنی لگاریتمی دانه‌بندی نمونه محصول سنگ‌شکنی سرب چاه‌گز

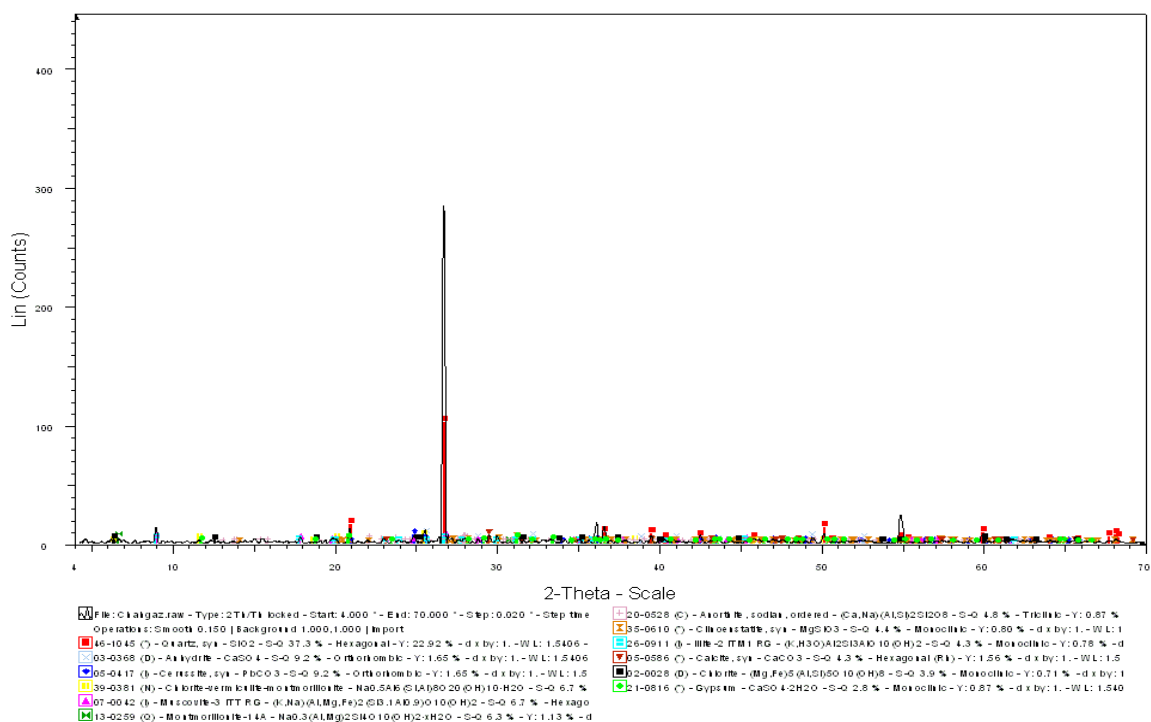
۳-۲-۲- مطالعات پراش اشعه ایکس (XRD)

مطالعه کانی‌شناسی به روش XRD نیمه کمی بر روی نمونه معرف انجام شد. در جدول (۳-۲) و

شکل (۳-۴) کانی‌های تعیین شده ارائه شده است.

جدول ۳-۲- نتایج مطالعات XRD نیمه کمی

نام کانی	فرمول شیمیایی	درصد وزنی
کوارتز	SiO_2	۳۹/۸
انیدریت	CaSO_4	۹/۴
سروزیت	PbCO_3	۹/۴
کلریت و ورمیکولیت	$\text{Na}_{0.5}\text{Al}_6(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$	۶/۹
موسکویت	$(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}3.1\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	۶/۹
مونت موریلونیت	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2-x}\text{H}_2\text{O}$	۴/۶
کلینونستاتیت	MgSiO_3	۴/۶
کلسیت	CaCO_3	۴/۵
ایلیت	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	۴/۵
آنورتیت	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_2\text{O}_8$	۳/۵
کلریت	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5(\text{Al}, \text{Si})_5\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	۳/۰
ژیپس	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	۲/۹



شکل ۳-۴- نمودار مطالعات XRD

۳-۳-۳ مطالعات فلورسانس اشعه ایکس (XRF)

به منظور شناسایی کلی اکسیدها و عناصر موجود، نمونه معرف با روش XRF تجزیه شد که نتایج در

جدول (۳-۳) ارائه شده است.

جدول ۳-۳- نتایج آنالیز شیمیایی به روش XRF

ترکیبات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂
درصد وزنی	۴۲/۶۱	۱۱/۷۸	۱۲/۵۹	۳/۶۶	۰/۰۸	۲/۰۹	۱/۰۷	۰/۰۸۱	۰/۴۲
ترکیبات	P ₂ O ₅	Pb	Zn	BaO	SO ₃	Cu	SrO	L.O.I	-
درصد وزنی	۰/۰۷۱	۶/۵۲	۲/۳۸	۱/۶۶	۳/۹۲۳	۰/۱	۰/۰۶۵	۱۰/۹	-

همانطور که ملاحظه می‌شود، سرب با عیاری حدود ۶/۵ درصد در قالب کانی سرویت در نمونه

موجود است.

۳-۳-۴ مطالعات میکروسکوپی

مطالعات میکروسکوپی در قالب مقاطع صیقلی و تیغه نازک بر روی بخش‌های مختلف دانه‌بندی انجام

شد که خلاصه نتایج در ادامه ارائه شده است (شکل ۳-۵).

نتایج کلی حاکی از وجود تشکیل دهنده‌های زیر در نمونه معرف و محدوده‌های ابعادی است:

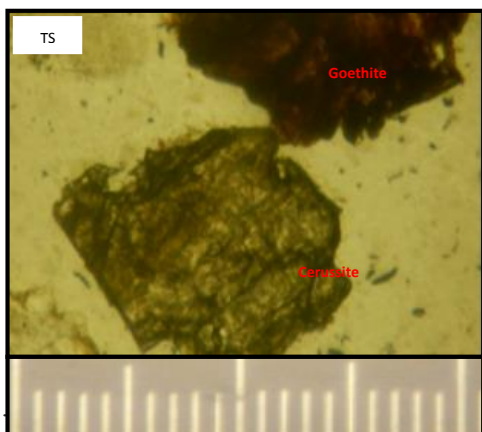
- قطعات سنگ‌های دگرگونی شامل شیست و احتمالاً سنگ‌های دگرگونی مجاورتی.
- قطعات کربناتی سرب و روی به شکل سروزیت و به ندرت اسمیت‌زونیت.
- اکسید و هیدروکسیدهای آهن بیشتر از نوع گوتیت
- کانی‌های کدر و نیمه شفاف عمدتاً گوتیت و کانی‌های مذکور به صورت‌های مختلف شامل
پزودومورف پیریت، شکل‌های کنگرسیونی، لکه‌های پراکنده و پوشش اطراف کانی‌های دیگر مشاهده شده است.

قطعات خرده سنگی موجود نیز شامل موارد ذیل است:

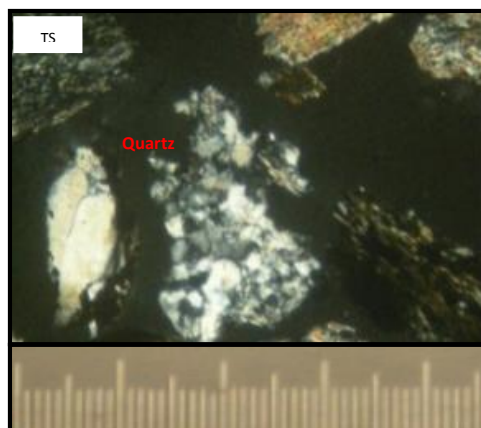
- کانی‌های ثانوی مس شامل مالاکیت و آزوریت که درگیر با قطعات خرده سنگی میکروکریستالی هستند.
- قطعات کانه کربناتی شامل سروزیت و اسمیت‌زونیت که با اکسید و هیدروکسیدهای آهن شامل
گوتیت و باریت و کوارتز درگیر هستند.
- خرده سنگ‌های دگرگونی شامل اسلیت و شیست.
- خرده سنگ‌های رسوبی شامل کلسیت و دولومیت.
- خرده سنگ‌های سیلیسی به صورت مجموعه‌های میکروکریستالی (چرت)، قطعات درشت کوارتز
(احتمالاً از تیپ هیدروترمال)
- قطعات سنگ‌های آتشفشانی شامل لاتیت و احتمالاً ریولیت.

موارد قابل توجه در مورد مقدار و نوع کانه‌های اقتصادی شامل:

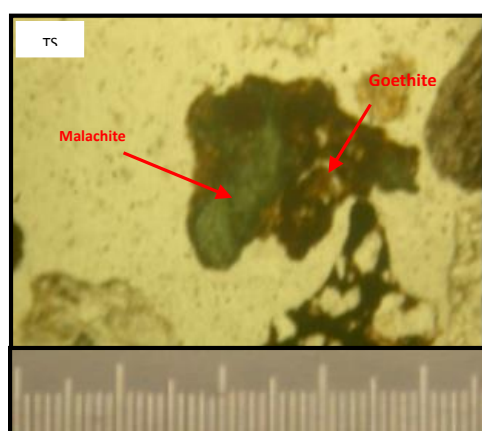
- در بین کانی‌های نیمه شفاف، سروزیت فراوان‌ترین و مالاکیت، آزوریت و اسمیت‌زونیت در اقلیت می‌باشند. بیشترین درگیری سروزیت با گوتیت است، بخشی نیز با کوارتز درگیر بوده و به صورت پوشش دیده شده است.
 - قطعات سرباره مقدار قابل توجهی دارد که حاوی مقادیر جزئی مس طبیعی و سایر ترکیبات آن می‌باشد.
 - گانگ متنوع است که شامل کربنات‌ها (کلسیت و دولومیت)، کانی‌های سیلیس (کوارتز درشت بلور و ریز بلور)، میکاها (عمدتاً شامل سریسیت و کمتر کلریت و بیوتیت)، در واقع گانگ هم کوارتز و هم سنگهای دگرگونی است که شامل سیلیکات‌ها و فیلوسیلیکات‌ها است.
- در این نمونه‌ها کانه اصلی سروزیت و گانگ سیلیسی بوده است و ۸۵ درصد از سروزیت در ابعاد کمتر از ۷۵ میکرون آزاد می‌شود.



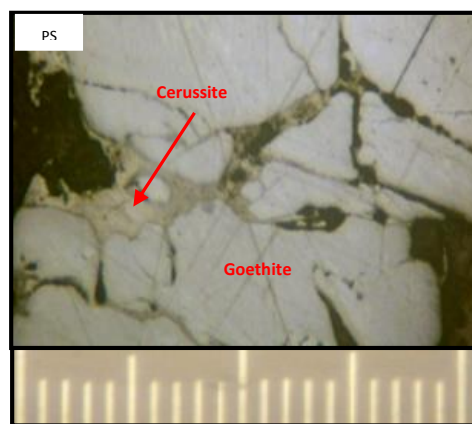
ب: مجاورت گوتیت و سروزیت



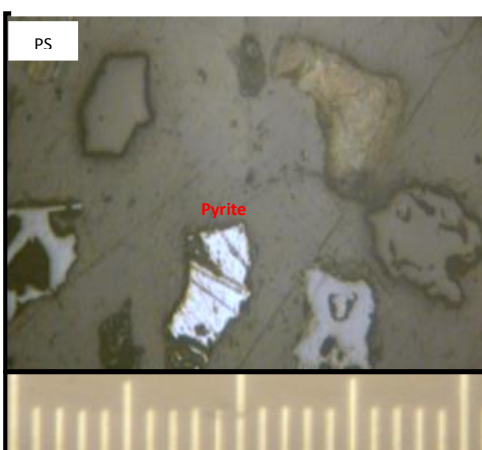
الف: میکروکریستال‌های کوارتز از دو منشأ کانی‌زایی.



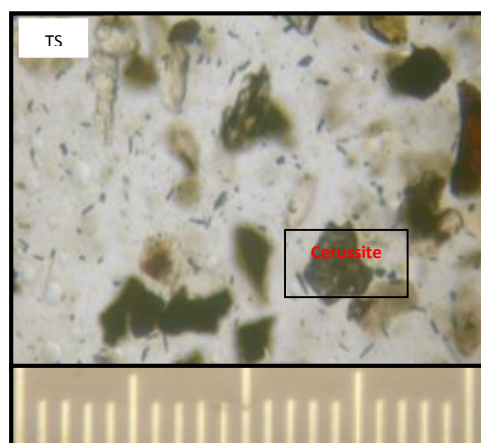
د: مجاورت مالاکیت و گوتیت



ج: مجاورت سروزیت و گوتیت



و: پیریت آزاد

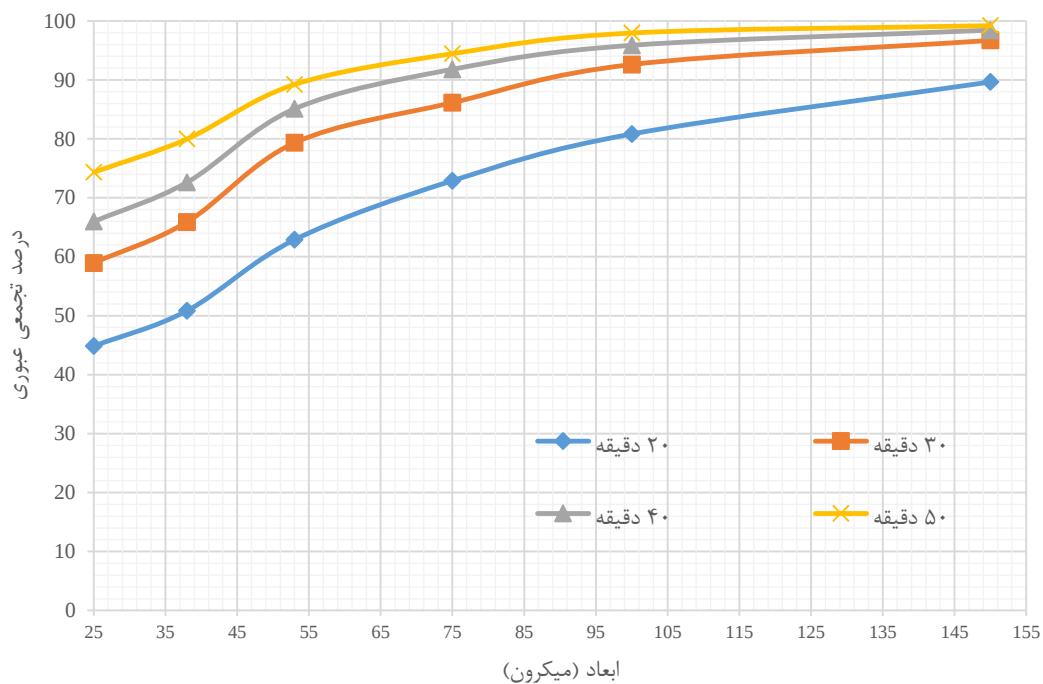


ه: ذرات سروزیت آزاد

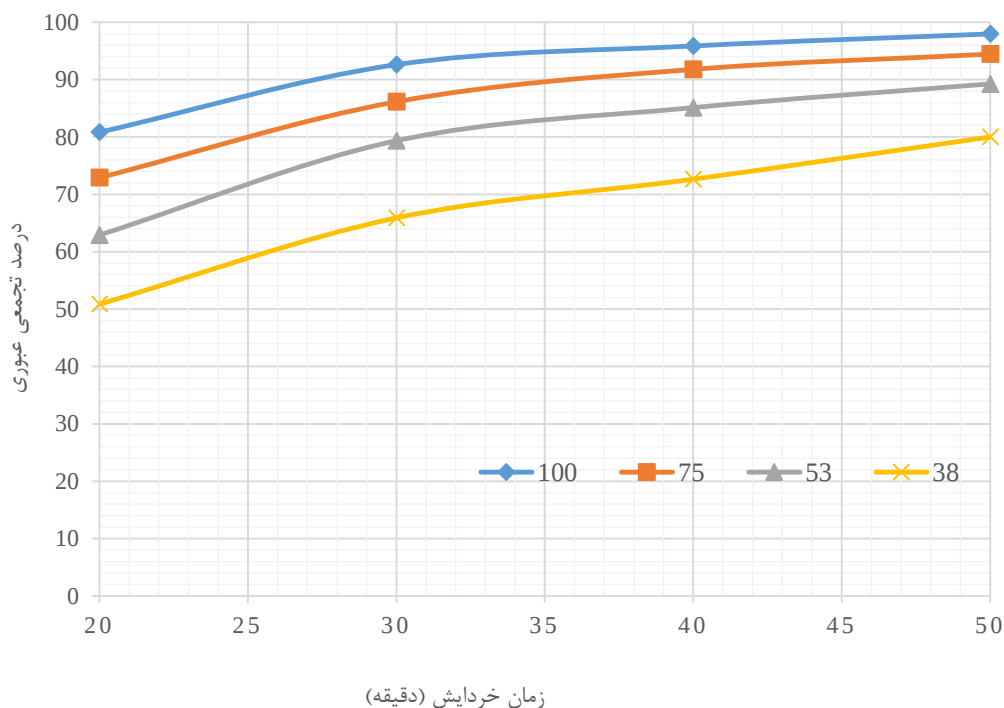
شکل ۳-۵- تصاویری از مطالعات میکروسکوپی، الف: تیغه نازک ۳۰۰+۶۰۰- میکرون، ب: تیغه نازک ۱۵۰+۳۰۰- میکرون، ج: مقطع صیقلی ۲۰۰۰+۲۳۸۰-، د: تیغه نازک ۳۰۰+۶۰۰- میکرون، ه: تیغه نازک ۳۸+۵۳- میکرون، و: مقطع صیقلی ۷۵+۱۰۰- میکرون. (در تمامی شکل‌ها هر درجه معادل ۱۶ میکرون می‌باشد)

۵-۳-۳- آزمایش‌های زمان خردایش

با وجود اینکه با افزایش زمان خردایش درصد بیشتری از کانی‌ها آزاد می‌شوند ولی به دنبال آن نرمه بیشتری تولید می‌شود. برای تعیین زمان بهینه خردایش با آسیای میله‌ای در زمان‌های ۱۹، ۲۶، ۳۲ و ۵۰ دقیقه خردایش انجام شده است که در این حالت d_{80} ذرات به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۷۵، ۵۳ و ۳۸ میکرون به دست آمد (شکل‌های (۶-۳) و (۷-۳)). گفتنی است در زمان‌های ذکر شده با توجه به مطالعات میکروسکوپی به ترتیب ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۹۵ درصد سروریت آزاد شده است. در زمان‌های مختلف آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شده که در ادامه به زمان و ابعاد بهینه اشاره شده است.



شکل ۶-۳- نمودار رابطه بین ابعاد و درصد تجمعی عبوری در زمان‌های مختلف



شکل ۳-۷- نمودار رابطه بین زمان خردایش و درصد تجمعی عبوری در d_{80} های مختلف

۳-۴- آزمایش های فلوتاسیون اولیه

ابتدا برای بررسی اولیه عوامل تأثیرگذار و مقادیر بهینه آنها برای انجام آزمایش های سینتیکی، حدود ۶۰ آزمایش اولیه فلوتاسیون انجام شد. پارامترها، شرایط و مقادیر انجام آن در جدول (۳-۴) ارائه شده است.

برای تعیین حداکثر مقدار مصرف سولفور سدیم بدین طریق عمل شد که، مقادیر متفاوتی از سولفور سدیم به پالپ اضافه شده و سپس مقداری از پالپ فیلتر شده و به آب فیلتر چند قطره استات سرب اضافه گردید. در شرایطی که با افزودن استات سرب رنگ آب تیره شود، نشان دهنده وجود سولفور سدیم در آب فیلتر است، که نشان از عدم جذب کامل آن بر سطح ذرات دارد. لذا می توان نتیجه گرفت که سولفور سدیم بیشتر از میزان مورد نیاز استفاده شده است. در این آزمایش ها پس از اضافه کردن ۳۰۰۰۰ گرم بر تن این تغییر رنگ رخ داد و به همین دلیل آزمایش ها تا این میزان سولفور سدیم انجام گرفت.

در مورد انتخاب نوع کلکتور سعی شد تا موارد زیر مد نظر قرار گیرد:

- استفاده از کلکتورهای مختلف

- استفاده از کلکتور با طول زنجیر مختلف

- استفاده از کلکتور ترکیبی

همچنین در مورد مصرف کلکتور این نکته را می‌بایست مد نظر قرار داد که مقدار مصرف کلکتور در

کانی‌های کربناته بسیار بیشتر از کانی‌های سولفوره می‌باشد.

جدول ۳-۴- پارامترها، شرایط و مقادیر آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون

ردیف	پارامترهای آزمایش	شرایط و مقادیر انجام آزمایش
۱	میزان کف‌ساز روغن کاج (گرم بر تن)	صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵
۲	میزان عامل سولفید کننده سولفور سدیم (گرم بر تن)	صفر، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰، ۵۰۰۰، ۶۰۰۰، ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۲۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰
۳	نوع کلکتور	آمیل گزنات پتاسیم (PAX)، ایزوبوتیل گزنات سدیم (SIBX)، ایزوپروپیل گزنات سدیم (SIPX)، دانافلوت ۵۰۷، دانافلوت ۲۳۳، دانافلوت ۲۴۵ *
۴	میزان کلکتور (گرم بر تن)	۲۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۲۵۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰
۵	ابعاد - d ₈₀ (میکرون)	۳۸، ۵۳، ۷۵ و ۱۰۰
۶	هوادهی در زمان آماده‌سازی	با و بدون هوادهی
۷	افزایش زمان آماده‌سازی	با و بدون افزایش زمان آماده‌سازی
۸	نرمه‌گیری	با و بدون نرمه‌گیری
۹	درصد جامد پالپ	۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰
۱۰	pH	۶، ۷/۵، ۸/۵، ۹/۵ و ۱۱
۱۱	اضافه کردن کلکتور در دو مرحله	اضافه کردن در دو مرحله و یا همان مقدار در یک مرحله
۱۳	خردایش مجدد	با و بدون خردایش مجدد

* دانافلوت ۵۰۷: دی ایزوبوتیل دی تیوفسفات سدیم + تیونوکربامات، دانافلوت ۲۳۳: دی ایزوپروپیل دی تیوفسفات سدیم و دانافلوت ۲۴۵: دی ایزوبوتیل دی تیوفسفات سدیم

در هر بخش از آزمایش‌ها یک پارامتر بهینه‌سازی شده است. پس از بدست آوردن مقدار بهینه کف-

ساز بخش بعدی از آزمایش‌ها برای بهینه‌سازی پارامتر دیگر، از مقادیر بهینه شده پارامتر قبلی استفاده شده است.

۳-۴-۱- بررسی تأثیر میزان کفساز (روغن کاج)

برای بررسی تأثیر میزان کفساز ۴ آزمایش با مقادیر صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ گرم بر تن کفساز روغن کاج انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۳-۸) ارائه شده است.

شرایط آزمایش‌ها:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کفساز: متغیر

عامل سولفید کننده: ۲۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: آمیل گرانتات پتاسیم (PAX)

میزان کلکتور: ۹۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده‌سازی: بدون هوادهی

زمان آماده‌سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کفساز (۱ دقیقه)

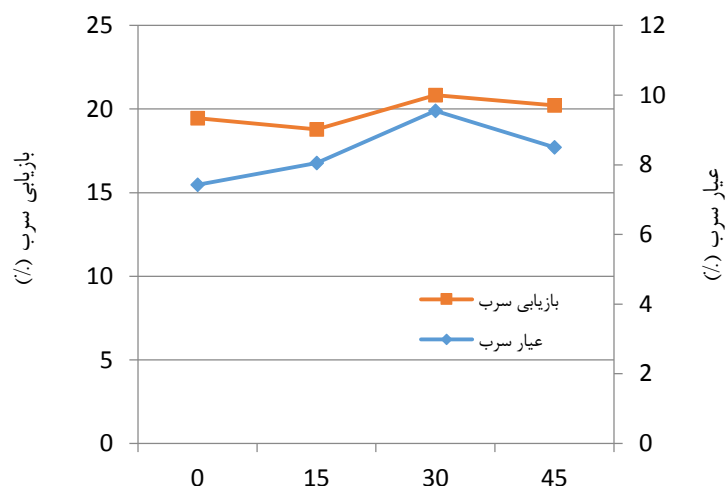
نرمه‌گیری قبل از فلوئتاسیون: بدون نرمه‌گیری

درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

همانطور که دیده شد بهترین نتیجه از لحاظ عیار و بازیابی در مقدار ۳۰ گرم بر تن کفساز بدست آمده است.



شکل ۳-۸- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیابی سرب در مقادیر مختلف کف‌ساز (گرم بر تن)

۳-۴-۲- بررسی تأثیر میزان سولفور سدیم

ابتدا برای تعیین حداکثر میزان سولفور سدیم قابل استفاده به روش زیر عمل شده است.

مقادیر متفاوتی از سولفور سدیم به پالپ اضافه شده و سپس مقداری از پالپ فیلتر شده و به آب فیلتر چند قطره استات سرب اضافه گردید. در شرایطی که با افزودن استات سرب رنگ آب تیره شود، نشان دهنده وجود سولفور سدیم در آب فیلتر است، که نشان از عدم جذب کامل آن بر سطح ذرات دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که سولفور سدیم بیشتر از میزان مورد نیاز استفاده شده است.

مقدار بالای سولفور باعث تیره شدن پالپ می‌شود. در بالاتر از ۳۰۰۰۰ گرم بر تن آب فیلتر با اضافه کردن استات سرب تیره شد. به همین خاطر یک آزمایش جدید با ۲۵۰۰۰ گرم بر تن انجام شد. در این مقدار از سولفور سدیم، با اضافه کردن استات سرب رنگ آب فیلتر تیره نشد. این آزمایش نشان می‌دهد که مقدار سولفور سدیم نباید بیشتر از ۳۰۰۰۰ گرم بر تن باشد.

در ادامه با مقادیر متفاوتی از سولفور سدیم در شرایط زیر آزمایش فلوتاسیون انجام شده که نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۳-۹) ارائه شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: متغیر

نوع کلکتور: آمیل گزانتات پتاسیم (PAX)

میزان کلکتور: ۹۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده‌سازی: بدون هوادهی

زمان آماده‌سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف‌ساز (۱ دقیقه)

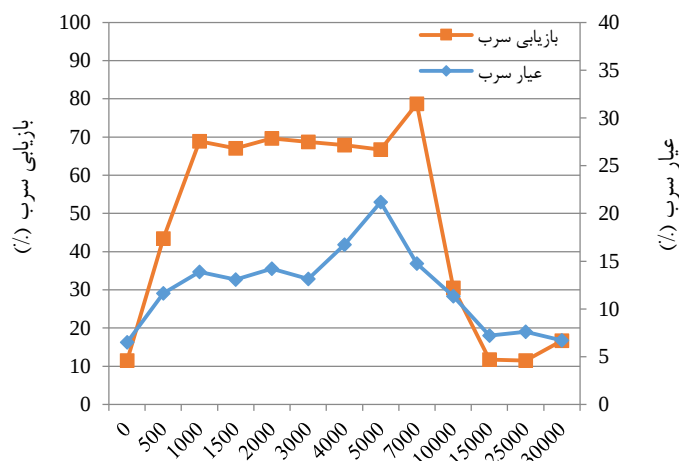
نرمه‌گیری قبل از فلوئتاسیون: بدون نرمه‌گیری

درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

همانطور که در شکل (۳-۹) نشان داده شده بدون استفاده از سولفور سدیم بازیابی و عیار مطلوبی حاصل نشده است که این موضوع نشان دهنده عدم وجود گالن در نمونه است. همچنین در ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ گرم بر تن (هر دو) نتایج مطلوبی بدست آمد است. ولی باید دید در کدام یک از شرایط بازدهی جدایش بالاتر است. در ۵۰۰۰ گرم بر تن بازدهی جدایش ۵۵/۲۱ و در ۷۰۰۰ گرم بر تن ۵۳/۸۳ است که نشان دهنده آن است که اضافه کردن ۵۰۰۰ گرم بر تن شرایط بهتری را ارائه داده است. برای بررسی بهتر یک آزمایش نیز در شرایط ۶۰۰۰ گرم بر تن سولفور سدیم انجام شد که عیار، بازیابی و بازدهی جدایش آن به ترتیب ۱۷/۳۴، ۷۰/۷۶ و ۵۴/۸۹ درصد بدست آمده است، که نشان می‌دهد میزان ۵۰۰۰ گرم بر تن مناسب‌ترین مقدار برای سولفور سدیم است.



شکل ۳-۹- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیابی سرب در مقادیر مختلف سولفور سدیم (گرم بر تن)

۳-۴-۳- بررسی تأثیر نوع کلکتور

جهت بررسی تأثیر نوع کلکتور شش آزمایش فلوتاسیون با استفاده از کلکتورهای، آمیل گزانتات پتاسیم (PAX)، ایزوبوتیل گزانتات سدیم (SIBX)، ایزوپروپیل گزانتات سدیم (SIPX)، دانافلوت ۲۴۵، دانافلوت ۲۳۳ و دانافلوت ۵۰۷ انجام شده که شرایط آن‌ها در ادامه آورده شده است. به طور کلی در هنگام استفاده از PAX و دانافلوت ۵۰۷ در انجام آزمایش وضعیت ظاهری کف بهتر از زمانی بود که از کلکتورهای دیگر استفاده گردید. نتایج این شش آزمایش در شکل (۳-۱۰) ارائه شده است. در این آزمایش در شرایطی که از آمیل گزانتات استفاده شده بود پتانسیل رداکس پالپ 170 mV - بدست آمده که این عدد بیش از هر پارامتر دیگر به میزان سولفید سدیم و گزانتات بستگی دارد.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: متغیر

میزان کلکتور: ۹۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده‌سازی: بدون هوادهی

زمان آماده‌سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف‌ساز (۱ دقیقه)

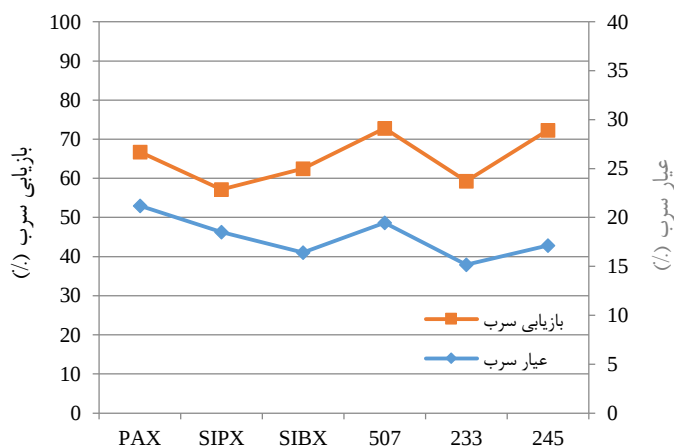
نرمه‌گیری قبل از فلوئاسیون: بدون نرمه‌گیری

درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

نتایج ارائه شده در جداول فوق نشان داد که کلکتور PAX، دانافلوت ۲۴۵ و دانافلوت ۵۰۷ نتایج نسبتاً بهتری نسبت به سایر کلکتورها ایجاد نموده است. برای تعیین کلکتور بهتر از میان این سه کلکتور به بررسی بازدهی جدایش آن‌ها پرداخته شده است. بازدهی جدایش در هنگام استفاده از کلکتورهای ۲۴۵، PAX و دانافلوت ۵۰۷ به ترتیب ۵۴/۷۳، ۵۵/۴ و ۵۷/۶ بدست آمده که نشان از برتری دانافلوت ۵۰۷ است. در ضمن رنگ کف در دانافلوت ۵۰۷ کمی روشن‌تر از زمانی بود که از کلکتورهای دیگر استفاده شد.



شکل ۳-۱۰- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیابی سرب با کلکتورهای مختلف

۳-۴-۴- بررسی تأثیر میزان کلکتور

با انجام چند آزمایش تأثیر میزان کلکتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۳-۳)

(۱۱) ارائه شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: دانافلوت ۵۰۷

میزان کلکتور: متغیر

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده‌سازی: بدون هوادهی

زمان آماده‌سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف‌ساز (۱ دقیقه)

نرمه‌گیری قبل از فلوتاسیون: بدون نرمه‌گیری

درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

همانطور که دیده می‌شود بهترین شرایط در میزان ۱۰۰۰ گرم بر تن کلکتور بدست آمده است.

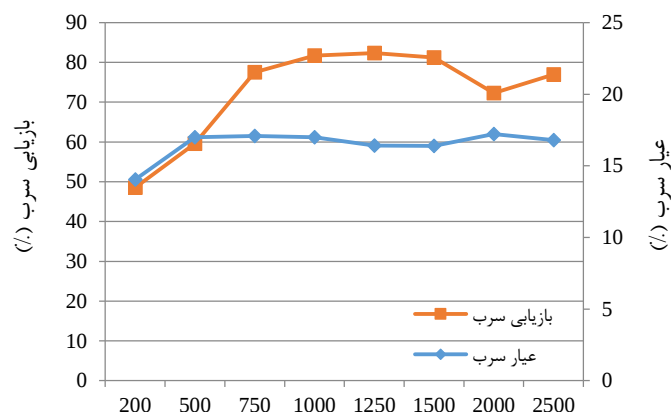
برای دقت بیشتر دو آزمایش دیگر در ۷۵۰ و ۱۲۵۰ گرم بر تن انجام شده است.

بازدهی جدایش نیز برای این آزمایش‌ها محاسبه شده که نتایج آن در جدول (۳-۵) ارائه شده است.

همانطور که دیده می‌شود میزان ۱۰۰۰ گرم بر تن میزان بهینه کلکتور است.

جدول ۳-۵- نتایج بازدهی جدایش به منظور بررسی تأثیر میزان بهینه کلکتور

مقدار کلکتور (گرم بر تن)	۲۰۰	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰
بازدهی جدایش (درصد)	۳۹/۵۴	۴۶/۵۶	۵۷/۲۵	۵۸/۵۵	۵۸/۳۶	۵۷/۳۴	۵۴/۸۶	۵۵/۹۳



شکل ۳-۱۱- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیابی سرب در مقادیر مختلف کلکتور (گرم بر تن)

۳-۴-۵- بررسی تأثیر زمان خردایش

با وجود اینکه با افزایش زمان خردایش درصد بیشتری از کانی‌ها آزاد می‌شوند ولی به دنبال آن نرمه بیشتری تولید می‌شود. برای تعیین زمان بهینه خردایش با آسیای میله‌ای در زمان‌های ۱۹، ۲۶، ۳۲ و ۵۰ دقیقه خردایش انجام شده که محصول آسیا خوراک آزمایش‌های فلوتاسیون را فراهم کرده است. لازم به ذکر است که در زمان‌های ذکر شده با توجه به مطالعات میکروسکوپی به ترتیب ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۹۵ درصد سرزیت آزاد می‌شود. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۳-۱۲) ارائه شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: عامل ۵۰۷

میزان کلکتور: ۱۰۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: متغیر

هوادهی در زمان آماده‌سازی: بدون هوادهی

زمان آماده‌سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف‌ساز (۱ دقیقه)

نرمه‌گیری قبل از فلو تاسیون: بدون نرمه‌گیری

درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

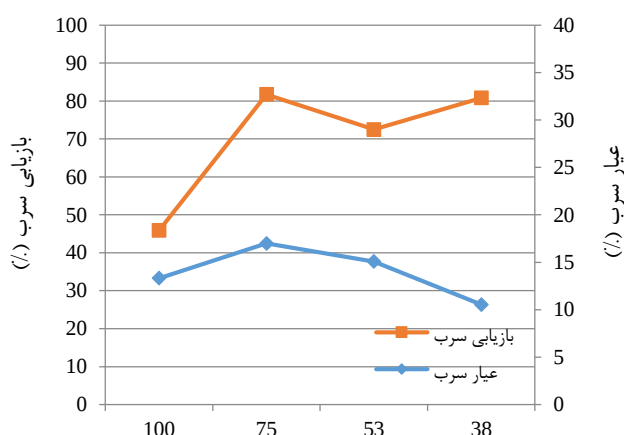
خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

برای تعیین بهتر شرایط بهینه از بازدهی جدایش نیز استفاده شده که نتایج آن در جدول (۳-۶)

ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بهترین شرایط مربوط به زمان خردایش ۲۶ دقیقه (۷۵ میکرون) است.

جدول ۳-۶- نتایج بازدهی جدایش به منظور بررسی زمان خردایش

زمان خردایش (دقیقه)	۱۹	۲۶	۳۲	۵۰
بازدهی جدایش	۳۶/۳۸	۵۸/۵۵	۵۱/۹۲	۴۲/۲۹



شکل ۳-۱۲- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیایی سرب در ابعاد ذرات مختلف (d_{80}) بر حسب میکرون

۳-۴-۶- بررسی تأثیر هوادهی در هنگام آماده‌سازی

حضور سولفور سدیم سبب کاهش میزان اکسیژن در پالپ خواهد شد که برای رفع آن در برخی

منابع ذکر شده جهت که می‌توان در زمان آماده‌سازی، هوادهی انجام داد (Weiss, 1985). برای بررسی تأثیر

هوادهی دو آزمایش یکسان یکی با هوادهی در هنگام آماده‌سازی و دیگری بدون هوادهی انجام شده که نتایج آن در شکل (۳-۱۳) ارائه شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: عامل ۵۰۷

میزان کلکتور: ۱۰۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده‌سازی: متغیر

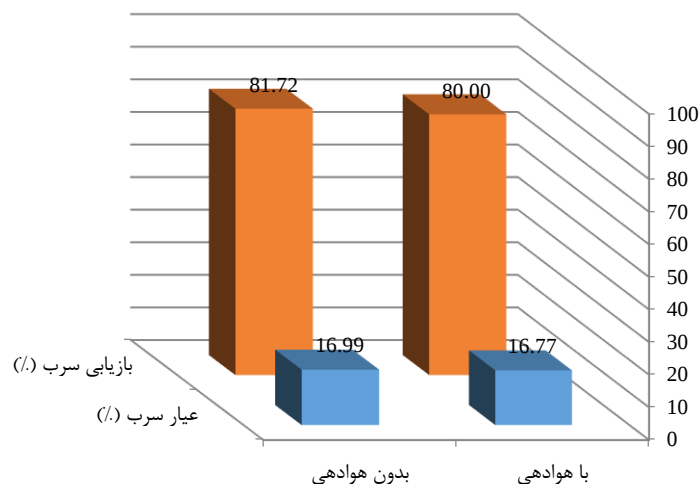
زمان آماده‌سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف‌ساز (۱ دقیقه)

نرمه‌گیری قبل از فلو تاسیون: بدون نرمه‌گیری

درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد



شکل ۳-۱۳- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیابی سرب با و بدون هوادهی

۳-۴-۷- بررسی تأثیر زمان آماده‌سازی

در مطالعات اولیه زمان آماده‌سازی برای سولفور سدیم، کلکتور و کفساز به ترتیب ۱۰، ۴ و ۱ دقیقه در نظر گرفته شده است. در این آزمایش، این زمان‌ها به ترتیب به ۲۰، ۶ و ۲ دقیقه افزایش یافت. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۳-۱۴) ارائه شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کفساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: عامل ۵۰۷

میزان کلکتور: ۱۰۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده‌سازی: بدون هوادهی

زمان آماده‌سازی: متغیر

نرمه‌گیری قبل از فلوئاسیون: بدون نرمه‌گیری

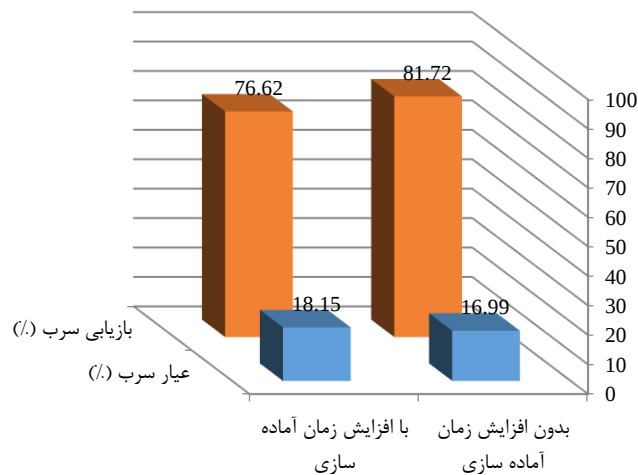
درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

بازدهی جدایش در حالتی که زمان آماده‌سازی برای سولفور سدیم، کلکتور و کف‌ساز به ترتیب ۱۰، ۴ و ۱ دقیقه است، برابر با ۵۸/۵۵ است. و در حالتی که این زمان‌ها به ترتیب ۲۰، ۶ و ۲ دقیقه است برابر است با ۵۵/۲۴.

همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش زمان آماده‌سازی تاثیر مثبتی در بهبود فلوتاسیون ندارد.



شکل ۳-۱۴- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیابی سرب با و بدون افزایش زمان آماده‌سازی

۳-۴-۸- بررسی تأثیر نرمه‌گیری قبل از فلوتاسیون

وجود نرمه در فلوتاسیون مضر است، به همین دلیل با استفاده از هیدروسیکلون با حد جدایش ۸ تا ۱۰ میکرون از خوراک نرمه‌گیری به عمل آمده و سپس قسمت درشت‌تر به فلوتاسیون برده شده است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۳-۱۵) ارائه شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: عامل ۵۰۷

میزان کلکتور: ۱۰۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده سازی: بدون هوادهی

زمان آماده سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف ساز (۱ دقیقه)

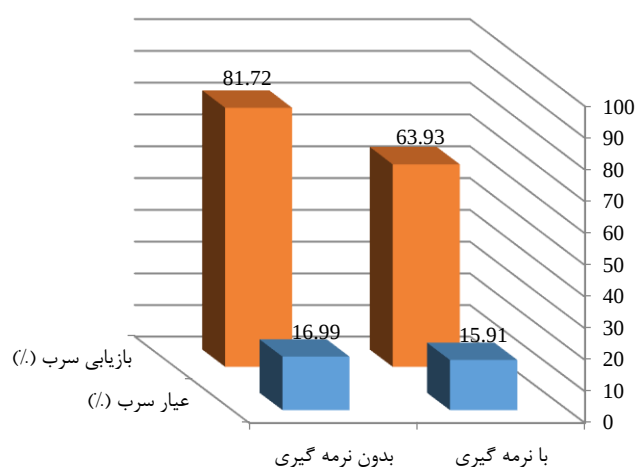
نرمه گیری قبل از فلو تاسیون: متغیر

درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

سروزیست کانی است که در اثر خردایش نرمه زیادی تولید می کند. از این رو با نرمه گیری سروزیست زیادی به باطله می رود. همانطور که دیده می شود نرمه گیری تأثیر منفی بر عیار و بازیابی فلو تاسیون دارد.



شکل ۳-۱۵- نمودار مقایسه ای عیار و بازیابی سرب با و بدون نرمه گیری

۳-۴-۹- بررسی تأثیر درصد جامد پالپ

در این آزمایش تأثیر درصد جامد مورد بررسی قرار گرفته است. درصد جامد در فلوتاسیون کانی‌های سرب حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد است که در این آزمایش مقادیر درصد جامد، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مورد مطالعه قرار گرفته که نتایج آن در شکل (۳-۱۶) ارائه شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: عامل ۵۰۷

میزان کلکتور: ۱۰۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده‌سازی: بدون هوادهی

زمان آماده‌سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف‌ساز (۱ دقیقه)

نرمه‌گیری قبل از فلوتاسیون: بدون نرمه‌گیری

درصد جامد پالپ: متغیر

pH: ۹/۵

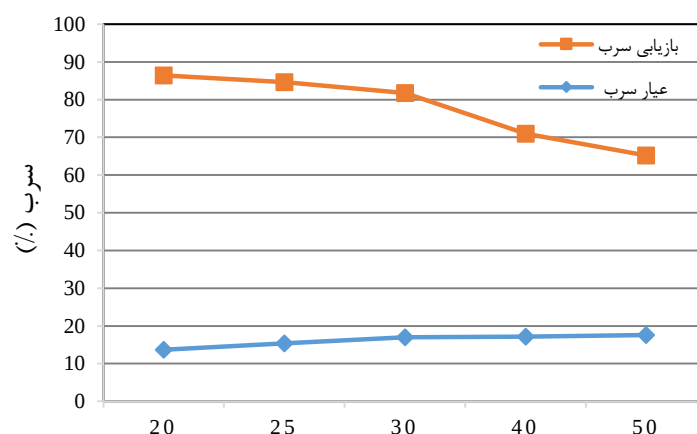
خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

برای مقایسه بهتر از بازدهی جدایش کمک گرفته شده که نتایج آن در جدول (۳-۷) آورده شده

است. با توجه به بازدهی جدایش درصد جامد ۳۰ بهترین شرایط را دارا بود.

جدول ۳-۷- نتایج بازدهی جدایش به منظور بررسی تأثیر درصد جامد

درصد جامد (%)	۲۰	۲۵	۳۰	۴۰	۵۰
بازدهی جدایش	۵۳/۶۰	۵۷/۱۶	۵۸/۵۵	۵۴/۱۰	۵۱/۳۶



شکل ۳-۱۶- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیابی سرب در درصد جامدهای مختلف

۳-۴-۱۰- بررسی تأثیر pH

یکی از تأثیرگذارترین پارامترها در فلوتاسیون pH است. رنج pH مورد استفاده برای سرویست عموماً بین ۶ تا ۱۱ است. برای این منظور چند آزمایش در pHهای مختلف انجام شد که نتایج آنها در شکل (۳-۱۷) آورده شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: عامل ۵۰۷

میزان کلکتور: ۱۰۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده‌سازی: بدون هوادهی

زمان آماده‌سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف‌ساز (۱ دقیقه)

نرمه‌گیری قبل از فلوئاسیون: بدون نرمه‌گیری

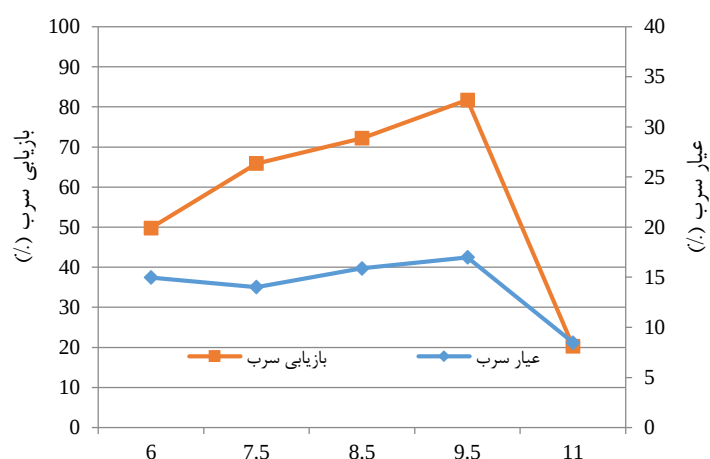
درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: متغیر

خردایش مجدد: بدون خردایش مجدد

آزمایش در pH ۹/۵ چندین بار در آزمایش‌های قبل با شرایط مشابه با این آزمایش‌ها انجام شد که

نتایج آن از این آزمایش‌ها بهتر بوده است. در نتیجه pH ۹/۵ بهترین نتیجه را حاصل نموده است.



شکل ۳-۱۷- نمودار مقایسه‌ای عیار و بازیابی سرب در pH های مختلف

۳-۴-۱۰- بررسی تأثیر خردایش مجدد

برای بررسی تأثیر خردایش مجدد تحت شرایط زیر دو آزمایش انجام شد که نتایج آن در شکل (۳-۳)

(۱۸) ارائه شده است.

شرایط آزمایش:

تنظیم کننده pH: کربنات سدیم

کف‌ساز: ۳۰ گرم بر تن روغن کاج

عامل سولفید کننده: ۵۰۰۰ گرم بر تن

نوع کلکتور: عامل ۵۰۷

میزان کلکتور: ۱۰۰۰ گرم بر تن

زمان خردایش: ۲۶ دقیقه

هوادهی در زمان آماده سازی: بدون هوادهی

زمان آماده سازی: عامل سولفور کننده (۱۰ دقیقه)، کلکتور (۴ دقیقه) و کف ساز (۱ دقیقه)

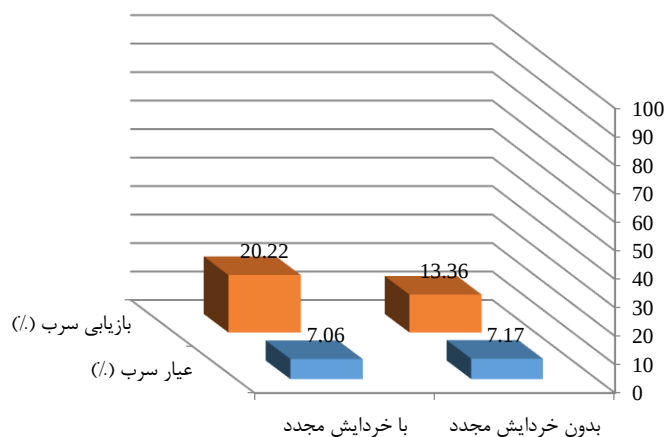
نرمه گیری قبل از فلوتاسیون: بدون نرمه گیری

درصد جامد پالپ: ۳۰ درصد

pH: ۹/۵

خردایش مجدد: متغیر

همانطور که ملاحظه می شود خردایش مجدد تأثیر زیادی بر فلوتاسیون ندارد.



شکل ۳-۱۸- نمودار مقایسه ای عیار و بازیابی سرب و تأثیر خردایش مجدد

نتایج به دست آمده از این آزمایش ها نشان داد که ۶ پارامتر pH، ابعاد ذرات، درصد جامد خوراک،

مقدار سولفور سدیم، نوع کلکتور و مقدار کلکتور بیش از سایر پارامترها بر فلوتاسیون سروزیت تأثیر دارند.

شرایط و مقادیر بهینه این پارامترها در جدول (۳-۸) ارائه شده است.

جدول ۳-۸- پارامترها، شرایط و مقادیر بهینه آزمایش‌های فلوتاسیون

فاکتور	پارامترهای آزمایش	واحد	شرایط و مقادیر بهینه
A	pH	-	۷/۵ تا ۹/۰
B	ابعاد ذرات	میکرون	۷۵ تا ۵۳
C	درصد جامد پالپ	درصد	۳۰ تا ۲۵
D	میزان سولفور سدیم	گرم بر تن	۷۰۰۰ تا ۴۰۰۰
E	میزان کلکتور	گرم بر تن	۲۵۰۰ تا ۱۵۰۰
F	نوع کلکتور	-	PAX و دانافلوت ۵۰۷

۳-۵- آزمایش‌های سینتیکی فلوتاسیون

در آزمایش‌های فلوتاسیون اولیه ابتدا با تغییر فاکتورهای مختلف مؤثر بر فلوتاسیون سرب کربناتی از قبیل نوع کلکتور، مقدار کلکتور، مقدار کف‌ساز، نوع و مقدار بازدارنده، pH، درصد جامد، حضور و عدم حضور فعال‌کننده، سرعت همزن، ابعاد ذرات، با و بدون نرمه‌گیری پیش از فلوتاسیون، افزایش زمان آماده‌سازی و سایر پارامترهای قابل اندازه‌گیری و قابل کنترل، سعی بر انتخاب مؤثرترین پارامترها و بازه‌های تأثیر آنها شده است. با مطالعه کلیه پارامترهای ذکر شده، بررسی‌های تکمیلی و فاکتورهایی را که تأثیر کمتری بر ثابت نرخ سینتیک دارند، حذف شدند.

در ادامه پس از انتخاب مؤثرترین پارامترها و بازه‌های آنها با کمک نرم افزار دی‌ایکس ۱۰^۱، ۶۴ آزمایش برای انجام آزمایش‌های سینتیکی طراحی شد. با کمک نتایج آزمایش‌ها و با استفاده از نرم‌افزار سیگماپلات ۱۲^۲، مناسب‌ترین مدل و پارامترهای آن از بین بیش از ۱۰۰ مدل انتخاب شدند و سپس پارامترهای مدل انتخابی به عنوان "پاسخ" در نرم‌افزار دی‌ایکس ۱۰ مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۵-۱- طراحی آزمایش‌های سینتیکی

در فرآیندهای مهندسی، عوامل ورودی متعددی با سطوح مختلف وجود دارند که هر کدام ممکن است بر روی پاسخ مورد نظر تأثیرگذار باشند، در بسیاری از این فرآیندها از روش سعی و خطا برای

^۱ DX10

^۲ SigmaPlot 12

شناسایی عوامل ورودی موثر استفاده می‌شود. اما اجرای روش سعی و خطا به آزمایش‌های زیادی احتیاج دارد لذا هزینه و صرف زمان بالایی را به وجود می‌آورد. روش طراحی آزمایش سطح پاسخ^۱، ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آمار است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که متغیر پاسخ موردنظر تحت تاثیر چندین متغیر ورودی قرار می‌گیرد، مفید می‌باشد و هدف نهایی آن بهینه‌سازی پاسخ مورد نظر است، هنگامی که عوامل و روابط زیادی روی متغیر پاسخ تأثیر داشته باشند (گلپایگانی ۱۳۹۲) و (Ghosal 2013).

انتخاب مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل مؤثر با توجه به هدف مسئله اولین گام در استفاده از روش سطح پاسخ می‌باشد و گام‌های بعدی، انتخاب طرح آزمایش، انجام آزمایش مطابق با روش طرح آزمایش و در نهایت برآزش تابع چند جمله‌ای و ارزیابی تناسب مدل می‌باشد (Bezerra 2008).

با توجه به تعداد زیاد متغیرهای مورد نظر، از روش مرکب مرکزی^۲ که یکی از روش‌های استاندارد روش سطح پاسخ است برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. در این روش هر متغیر در ۵ سطح شامل محوری بالا و پایین، حقیقی بالا و پایین و نقطه‌ی مرکزی به شکل عددی و کدگذاری شده تعیین می‌شوند. در طراحی آزمایش‌ها، pH، دانه‌بندی خوراک، درصد جامد، میزان سولفور سدیم، میزان کلکتور و نوع کلکتور به عنوان متغیرهای ورودی و پارامترهای مدل سینتیکی به عنوان پاسخ در نظر گرفته شدند. در این رساله از نرم افزار طراحی آزمایش نسخه‌ی ۱۰ استفاده و مطابق پارامترها و شرایط بهینه مندرج در جدول (۳-۸) تعداد ۶۴ آزمایش سینتیکی طراحی شده که در جدول (۳-۹) آمده است.

جدول ۳-۹- نتایج طراحی آزمایش‌های سینتیکی

آزمایش	پارامترهای آزمایش					
	pH	ابعاد ذرات	درصد جامد	میزان سولفور سدیم	میزان کلکتور	نوع کلکتور
1	9.0	75.0	25.0	4000.0	2500.0	507
2	8.3	44.0	27.5	5500.0	2000.0	507
3	6.9	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
4	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
5	8.3	64.0	27.5	2769.5	2000.0	507
6	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
7	7.5	53.0	30.0	7000.0	2500.0	PAX
8	9.0	75.0	30.0	7000.0	2500.0	507
9	8.3	64.0	27.5	5500.0	1089.8	507
10	7.5	75.0	25.0	4000.0	1500.0	507

¹ Response Surface

² Central composite design

آزمایش	پارامترهای آزمایش					
	pH	ابعاد ذرات	درصد جامد	میزان سولفور سدیم	میزان کلکتور	نوع کلکتور
11	7.5	53.0	25.0	4000.0	2500.0	PAX
12	9.0	75.0	25.0	7000.0	1500.0	507
13	8.3	44.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
14	7.5	75.0	30.0	4000.0	2500.0	PAX
15	8.3	64.0	27.5	5500.0	2910.2	PAX
16	9.0	53.0	25.0	7000.0	2500.0	PAX
17	9.0	53.0	30.0	7000.0	1500.0	PAX
18	9.0	53.0	30.0	4000.0	2500.0	507
19	8.3	64.0	27.5	8230.5	2000.0	507
20	9.0	53.0	25.0	4000.0	1500.0	PAX
21	9.0	75.0	25.0	7000.0	1500.0	PAX
22	7.5	53.0	30.0	4000.0	1500.0	507
23	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507
24	8.3	64.0	23.0	5500.0	2000.0	PAX
25	7.5	75.0	30.0	4000.0	2500.0	507
26	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507
27	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507
28	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507
29	7.5	75.0	30.0	7000.0	1500.0	507
30	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
31	8.3	64.0	27.5	5500.0	2910.2	507.0
32	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
33	7.5	53.0	25.0	7000.0	1500.0	PAX
34	8.3	64.0	27.5	5500.0	1089.8	PAX
35	9.0	53.0	30.0	7000.0	1500.0	507
36	8.3	64.0	32.1	5500.0	2000.0	507
37	7.5	53.0	30.0	7000.0	2500.0	507
38	9.0	53.0	25.0	7000.0	2500.0	507
39	9.0	75.0	30.0	4000.0	1500.0	507
40	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
41	7.5	75.0	30.0	7000.0	1500.0	PAX
42	9.0	75.0	30.0	7000.0	2500.0	PAX
43	7.5	75.0	25.0	4000.0	1500.0	PAX
44	8.3	64.0	32.1	5500.0	2000.0	PAX
45	7.5	53.0	30.0	4000.0	1500.0	PAX
46	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507
47	7.5	53.0	25.0	7000.0	1500.0	507
48	9.6	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
49	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507
50	9.0	53.0	30.0	4000.0	2500.0	PAX
51	8.3	84.0	27.5	5500.0	2000.0	507
52	8.3	64.0	27.5	2769.5	2000.0	PAX
53	7.5	53.0	25.0	4000.0	2500.0	507.0
54	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
55	8.3	64.0	27.5	8230.5	2000.0	PAX
56	7.5	75.0	25.0	7000.0	2500.0	PAX
57	8.3	64.0	23.0	5500.0	2000.0	507
58	7.5	75.0	25.0	7000.0	2500.0	507
59	9.6	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507
60	9.0	75.0	30.0	4000.0	1500.0	PAX
61	6.9	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507
62	8.3	84.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX
63	9.0	75.0	25.0	4000.0	2500.0	PAX
64	9.0	53.0	25.0	4000.0	1500.0	507

۳-۵-۲- انجام آزمایش‌های سینتیکی

برای انجام تمام آزمایش‌های سینتیکی فلوتاسیون روند ثابتی وجود داشته که در ادامه اشاره شده است.

- ابتدا ۱ کیلوگرم نمونه معرف در آسیای گلوله‌ای در مدت زمان مشخص (که از آزمایش‌های زمان خردایش به دست آمده) آسیا شده است.
- نمونه آسیا شده با درصد جامدهای مختلف به سلول فلوتاسیون ۲/۲ لیتری دنور مدل D-12 اضافه می‌شد.
- مقدار مشخصی از سولفور سدیم به پالپ اضافه شده و به مدت ۱۰ دقیقه آماده‌سازی شده است.
- با کمک کربنات سدیم و اسید سولفوریک، pH پالپ در مقدار مورد نظر تنظیم می‌شد.
- مقدار مشخص از کلکتور مورد نظر به سلول فلوتاسیون اضافه شده و برای عملکرد آن تحت ۴ دقیقه آماده‌سازی قرار گرفت.
- در ادامه ۳۰ گرم بر تن روغن کاج به عنوان کف‌ساز به پالپ اضافه شده و پس از ۱ دقیقه آماده‌سازی کف‌گیری آغاز شد.
- برای کف‌گیری دقیق‌تر و به خاطر حذف خطای انسانی، کف‌گیری به صورت اتوماتیک با سرعت ثابت صورت پذیرفت (مطابق شکل (۳-۱۹))
- برای حفظ کف‌گیری یکسان با نرخ ثابت تا انتهای آزمایش با کمک یک پمپ پرستالتیک، آب به سلول اضافه شد و سطح پالپ ثابت نگه داشته می‌شد.
- در زمان‌های کف‌گیری ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ دقیقه کنسانتره‌ها جداگانه گرفته شد.
- هر کنسانتره به طور مجزا فیلتر، خشک و وزن‌کشی شد و تحت آنالیز شیمیایی سرب با روش دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی^۱ قرار گرفت.

1 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

- برای هر آزمایش نتایج عیار و بازیابی سرب مطابق جدول (۳-۱۰) ارائه شده است.
- نتایج تجمعی هر آزمایش مشابه جدول (۳-۱۱) ارائه شده است.
- در انتها نمودار تجمعی زمان بازیابی مشابه شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۹- سیستم کفگیری خودکار

جدول ۳-۱۰- نتایج آزمایش اول فلوتاسیون

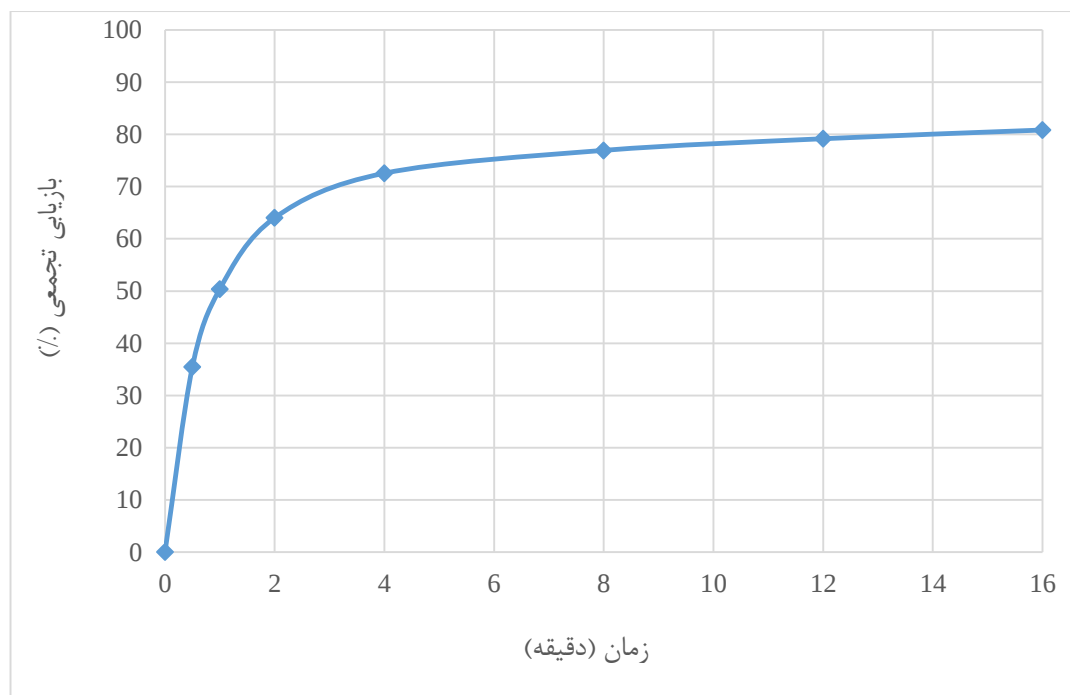
سرب		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
توزیع (%)	عیار (%)			
100.00	6.33	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
35.45	47.09	4.76	0.5	کنسانتره اول
14.91	26.41	3.57	0.5	کنسانتره دوم
13.64	18.12	4.76	1	کنسانتره سوم
8.53	9.22	5.86	2	کنسانتره چهارم
4.38	4.83	5.74	4	کنسانتره پنجم
2.22	3.77	3.73	4	کنسانتره ششم
1.67	2.60	4.07	4	کنسانتره هفتم
19.20	1.80	67.51	-	باطله نهایی

برای تمامی آزمایش‌ها نتایج و نمودارهای مشابه تهیه شد که نتایج آزمایش‌های انجام شده در پیوست ارائه شده است. در جدول (۳-۱۲) نتایج مجموع ۷ کنسانتره به صورت تجمعی ارائه شده است. در این جدول برای بررسی بهتر علاوه بر عیار و بازیابی سرب، بازدهی جدایش نیز ارائه شده است.

جدول ۳-۱۱- نتایج تجمعی آزمایش اول فلوتاسیون

شرح	زمان (دقیقه)	وزن (%)	سرب	
			عیار (%)	توزیع (%)
خوراک (محاسباتی)	0	100.00	6.33	100.00
1*	0.5	4.76	47.09	35.45
1+2	1	8.34	38.23	50.36
1+2+3	2	13.10	30.92	64.00
1+2+3+4	4	18.96	24.21	72.53
1+2+3+4+5	8	24.70	19.71	76.91
1+2+3+4+5+6	12	28.43	17.62	79.13
1+2+3+4+5+6+7	16	32.50	15.74	80.80
باطله نهایی	-	67.50	1.80	19.20

* اعداد نشانگر شمارنده کنسانتره‌ها هستند.



شکل ۳-۲۰- نمودار زمان و بازیابی تجمعی آزمایش اول

جدول ۳-۱۲- نتایج کلی آزمایش‌های سینتیکی فلوئاسیون

آزمایش	pH	d80	درصد جامد	مقدار سولفور سدیم	مقدار کلکتور	نوع کلکتور	عیار سرب (٪)	بازیابی سرب (٪)	بازدهی جدایش سرب (٪)
1	9.0	75.0	25.0	4000.0	2500.0	507.0	15.737	80.804	57.181
2	8.3	44.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	15.833	76.595	55.780
3	6.9	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	15.520	75.126	54.434
4	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	15.365	76.065	54.862
5	8.3	64.0	27.5	2769.5	2000.0	507.0	17.266	77.761	58.098
6	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	18.025	76.003	58.466
7	7.5	53.0	30.0	7000.0	2500.0	PAX	15.403	78.482	55.873
8	9.0	75.0	30.0	7000.0	2500.0	507.0	17.698	82.084	60.864
9	8.3	64.0	27.5	5500.0	1089.8	507.0	14.994	78.672	55.224
10	7.5	75.0	25.0	4000.0	1500.0	507.0	17.344	79.427	59.311
11	7.5	53.0	25.0	4000.0	2500.0	PAX	15.654	76.042	55.344
12	9.0	75.0	25.0	7000.0	1500.0	507.0	16.246	83.428	59.227
13	8.3	44.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	14.512	75.545	53.603
14	7.5	75.0	30.0	4000.0	2500.0	PAX	15.812	77.178	56.131
15	8.3	64.0	27.5	5500.0	2910.2	PAX	17.495	76.884	58.025
16	9.0	53.0	25.0	7000.0	2500.0	PAX	16.955	80.036	59.030
17	9.0	53.0	30.0	7000.0	1500.0	PAX	17.844	80.296	60.096
18	9.0	53.0	30.0	4000.0	2500.0	507.0	15.432	78.782	56.171
19	8.3	64.0	27.5	8230.5	2000.0	507.0	18.266	75.125	58.178
20	9.0	53.0	25.0	4000.0	1500.0	PAX	21.487	78.836	63.670
21	9.0	75.0	25.0	7000.0	1500.0	PAX	17.727	82.299	61.226
22	7.5	53.0	30.0	4000.0	1500.0	507.0	15.831	77.351	55.669
23	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	20.360	77.128	61.736
24	8.3	64.0	23.0	5500.0	2000.0	PAX	16.845	76.406	57.037
25	7.5	75.0	30.0	4000.0	2500.0	507.0	16.969	78.195	58.282
26	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	18.539	77.109	59.715
27	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	15.520	77.220	55.785
28	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	17.170	77.012	57.802
29	7.5	75.0	30.0	7000.0	1500.0	507.0	16.833	80.832	58.954
30	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	15.819	76.080	56.179
31	8.3	64.0	27.5	5500.0	2910.2	507.0	15.124	77.928	55.489
32	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	15.234	76.026	54.858
33	7.5	53.0	25.0	7000.0	1500.0	PAX	15.640	78.700	56.953
34	8.3	64.0	27.5	5500.0	1089.8	PAX	15.194	78.131	55.614
35	9.0	53.0	30.0	7000.0	1500.0	507.0	16.091	81.337	58.339
36	8.3	64.0	32.1	5500.0	2000.0	507.0	15.221	76.551	54.698
37	7.5	53.0	30.0	7000.0	2500.0	507.0	13.561	78.536	52.264
38	9.0	53.0	25.0	7000.0	2500.0	507.0	14.787	81.121	55.697
39	9.0	75.0	30.0	4000.0	1500.0	507.0	14.557	81.048	55.608
40	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	14.918	76.072	54.143
41	7.5	75.0	30.0	7000.0	1500.0	PAX	15.578	79.799	56.946
42	9.0	75.0	30.0	7000.0	2500.0	PAX	16.133	81.168	58.305

آزمایش	pH	d80	درصد جامد	مقدار سولفور سدیم	مقدار کلکتور	نوع کلکتور	عیار سرب (%)	بازیابی سرب (%)	بازدهی جدایش سرب (%)
43	7.5	75.0	25.0	4000.0	1500.0	PAX	15.668	78.405	56.133
44	8.3	64.0	32.1	5500.0	2000.0	PAX	16.738	75.490	56.749
45	7.5	53.0	30.0	4000.0	1500.0	PAX	13.912	77.239	53.012
46	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	16.853	76.086	57.342
47	7.5	53.0	25.0	7000.0	1500.0	507.0	13.691	79.742	53.300
48	9.6	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	14.373	79.179	54.233
49	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	18.911	77.177	60.326
50	9.0	53.0	30.0	4000.0	2500.0	PAX	16.614	77.619	57.274
51	8.3	84.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	16.876	77.470	57.950
52	8.3	64.0	27.5	2769.5	2000.0	PAX	17.740	76.658	58.328
53	7.5	53.0	25.0	4000.0	2500.0	507.0	16.900	77.109	57.852
54	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	19.172	76.070	59.798
55	8.3	64.0	27.5	8230.5	2000.0	PAX	15.736	74.052	54.331
56	7.5	75.0	25.0	7000.0	2500.0	PAX	19.410	79.564	62.100
57	8.3	64.0	23.0	5500.0	2000.0	507.0	15.983	77.458	56.440
58	7.5	75.0	25.0	7000.0	2500.0	507.0	18.072	80.659	61.054
59	9.6	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	18.481	81.599	61.861
60	9.0	75.0	30.0	4000.0	1500.0	PAX	20.377	79.981	63.462
61	6.9	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	15.979	76.180	56.130
62	8.3	84.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	19.503	76.399	60.560
63	9.0	75.0	25.0	4000.0	2500.0	PAX	18.747	79.762	61.322
64	9.0	53.0	25.0	4000.0	1500.0	507.0	16.088	79.920	58.072

اطلاعات نهایی و خلاصه آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شده که شامل زمان و بازیابی تجمعی می‌باشد

و در مدل‌سازی سینتیکی سروزیت مورد استفاده قرار خواهد گرفت در جدول (۳-۱۳) ارائه شده است.

جدول ۳-۱۳- نتایج زمان و بازیابی تجمعی آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شده

شماره آزمایش	زمان تجمعی کف‌گیری (دقیقه)							
	0	0.5	1	2	4	8	12	16
1	0.0	35.4	50.4	64.0	72.5	76.9	79.1	80.8
2	0.0	31.0	44.7	59.7	68.6	73.2	75.2	76.6
3	0.0	26.0	38.6	51.7	64.2	69.3	72.5	75.1
4	0.0	21.2	34.4	52.0	64.7	68.9	74.0	76.1
5	0.0	25.5	41.3	58.5	67.4	72.6	75.3	77.8
6	0.0	19.4	31.9	48.9	60.9	69.8	74.1	76.0
7	0.0	35.3	49.3	62.0	69.9	74.4	76.7	78.5
8	0.0	23.1	40.4	52.8	66.3	77.9	80.5	82.1
9	0.0	28.6	42.8	58.5	67.8	74.5	77.4	78.7
10	0.0	30.4	45.6	60.3	67.7	74.9	77.7	79.4
11	0.0	23.3	38.8	54.5	66.0	72.1	75.1	76.0
12	0.0	30.3	55.0	67.8	75.1	80.5	82.5	83.4
13	0.0	24.3	36.4	51.6	63.8	70.9	74.0	75.5
14	0.0	25.2	37.0	52.3	64.9	72.6	75.8	77.2
15	0.0	29.2	41.9	56.7	68.0	73.5	75.9	76.9
16	0.0	24.0	38.1	52.8	68.4	75.7	79.0	80.0
17	0.0	25.4	40.5	56.9	70.2	76.4	79.4	80.3
18	0.0	28.1	44.2	58.1	68.5	74.5	77.4	78.8
19	0.0	23.9	37.1	52.0	61.8	70.3	73.8	75.1
20	0.0	22.5	36.1	51.8	64.5	73.9	77.5	78.8
21	0.0	27.5	41.1	56.3	70.5	77.7	80.4	82.3
22	0.0	23.0	35.8	50.6	63.1	72.3	75.8	77.4
23	0.0	21.9	37.3	53.0	65.3	72.8	75.6	77.1
24	0.0	18.4	33.4	48.4	63.1	71.5	74.8	76.4
25	0.0	24.5	40.2	52.8	66.0	72.4	76.3	78.2
26	0.0	18.9	35.5	51.2	62.2	72.1	75.1	77.1
27	0.0	19.5	34.5	50.8	63.1	70.9	75.1	77.2
28	0.0	20.5	34.8	49.0	61.2	70.7	74.9	77.0
29	0.0	22.2	38.0	53.9	67.6	75.3	79.1	80.8
30	0.0	20.0	33.2	48.7	62.3	69.9	74.2	76.1
31	0.0	23.7	37.8	53.7	66.0	73.3	76.1	77.9
32	0.0	22.8	34.8	49.9	61.6	71.0	74.5	76.0
33	0.0	31.3	48.3	61.2	70.8	75.5	77.5	78.7
34	0.0	26.0	42.4	55.0	64.9	71.5	76.0	78.1
35	0.0	24.4	39.6	54.3	65.4	73.7	79.0	81.3
36	0.0	22.2	34.5	47.1	59.3	69.6	74.5	76.6
37	0.0	27.0	39.9	51.6	62.6	72.1	76.4	78.5
38	0.0	39.2	53.6	63.4	70.8	76.9	79.8	81.1
39	0.0	33.7	45.6	59.3	68.3	76.9	79.6	81.0
40	0.0	32.3	45.7	59.2	67.9	72.5	74.4	76.1
41	0.0	29.3	41.5	55.0	64.2	73.3	77.6	79.8
42	0.0	31.5	47.3	61.8	71.6	77.0	79.6	81.2
43	0.0	32.3	45.9	58.9	69.6	74.0	76.7	78.4
44	0.0	26.5	39.6	53.9	64.4	70.5	73.7	75.5
45	0.0	28.0	42.6	54.8	65.4	71.7	75.2	77.2
46	0.0	24.1	39.9	54.7	64.8	71.4	74.4	76.1
47	0.0	30.4	43.7	58.1	69.3	75.6	78.2	79.7
48	0.0	29.7	44.5	59.3	68.3	74.6	77.3	79.2
49	0.0	20.9	33.1	47.7	59.3	70.1	75.4	77.2
50	0.0	31.4	50.2	61.4	69.5	74.5	76.8	77.6
51	0.0	30.6	46.7	59.8	70.4	73.8	76.0	77.5
52	0.0	23.6	38.0	52.2	63.5	71.0	74.8	76.7
53	0.0	21.1	32.5	47.2	61.2	70.8	75.2	77.1
54	0.0	32.2	47.9	61.6	67.8	72.2	75.1	76.1
55	0.0	22.8	36.5	49.8	58.5	66.8	72.2	74.1
56	0.0	28.8	40.6	52.9	64.2	73.0	77.4	79.6
57	0.0	24.4	36.9	50.5	62.0	70.9	75.5	77.5
58	0.0	29.8	46.5	59.5	67.6	74.9	79.1	80.7
59	0.0	29.7	45.3	58.3	66.9	74.5	79.4	81.6
60	0.0	29.6	44.8	57.1	67.6	74.7	78.4	80.0
61	0.0	23.6	37.2	50.9	61.6	69.4	74.2	76.2
62	0.0	35.5	47.7	57.9	65.4	72.0	75.3	76.4
63	0.0	29.6	42.1	54.2	65.3	74.0	78.0	79.8
64	0.0	31.2	43.3	55.7	65.9	74.2	78.7	79.9

فصل چهارم

نتایج و یافته‌های تحقیق

۴-۱- کلیات مدل سازی

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش های سینتیکی فلوتاسیون و با استناد بر مدل سازی های ریاضی پیشین و مدل های ریاضی جدید، مدل سازی آزمایش های سینتیکی فلوتاسیون انجام شد. برای این منظور از نرم افزارهای اکسل و سیگماپلات^۱ نسخه ۳-۱۲ کمک گرفته شد.

در فصل دوم مدل های سینتیکی فلوتاسیون پیشین ارائه شده است. مدل های جدیدی که علاوه بر مدل های پیشین در مدل سازی مورد استفاده قرار گرفته در جدول (۴-۱) ارائه شده اند. این ۱۰۵ مدل در ۱۱ گروه مورد بررسی قرار گرفته اند. نهایتاً می توان گفت برای هر آزمایش ۱۴۰ مدل بر نمودارهای بازیابی و زمان تجمعی، تطبیق داده شد و تمامی پارامترهای آماری آنها بررسی شدند که با توجه به ۶۴ آزمایش انجام شده در مجموع ۸۹۶۰ مرتبه این کار انجام شد.

جدول ۴-۱- نتایج زمان و بازیابی تجمعی آزمایش های فلوتاسیون انجام شده

گروه مدل ها	نام مدل	مدل ریاضی
Polynomial	Linear	$y = y_0 + ax$
	Quadratic	$y = y_0 + ax + bx^2$
	Cubic	$y = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$
	Inverse First Order	$y = y_0 + \frac{a}{x}$
	Inverse Second Order	$y = y_0 + \frac{a}{x} + \frac{b}{x^2}$
	Inverse Third Order	$y = y_0 + \frac{a}{x} + \frac{b}{x^2} + \frac{c}{x^3}$

^۱ SigmaPlot

گروه مدل ها	نام مدل	مدل ریاضی
Peak	Gaussian, 3 Parameter	$y = a \cdot e^{[-0.5(\frac{x-x_0}{b})^2]}$
	Gaussian, 4 Parameter	$y = y_0 + a \cdot e^{[-0.5(\frac{x-x_0}{b})^2]}$
	Modified Gaussian, 4 Parameter	$y = a \cdot e^{[-0.5(\frac{ x-x_0 }{b})^2]}$
	Modified Gaussian, 5 Parameter	$y = y_0 + a \cdot e^{[-0.5(\frac{ x-x_0 }{b})^2]}$
	Lorentzian, 3 Parameter	$y = \frac{a}{1+(\frac{x-x_0}{b})^2}$
	Lorentzian, 4 Parameter	$y = y_0 + \frac{a}{1+(\frac{x-x_0}{b})^2}$
	Pseudo-Voigt, 4 Parameter	$y = a[c(\frac{1}{1+(\frac{x-x_0}{b})^2}) + (1 - c)c^{-0.5(\frac{x-x_0}{b})^2}]$
	Pseudo-Voigt, 5 Parameter	$y = y_0 + a[c(\frac{1}{1+(\frac{x-x_0}{b})^2}) + (1 - c)c^{-0.5(\frac{x-x_0}{b})^2}]$
	Log Normal, 3 Parameter	$y = \frac{a}{x} \exp[-0.5(\frac{\ln(\frac{x}{x_0})}{b})^2]$
	Log Normal, 4 Parameter	$y = y_0 + \frac{a}{x} \exp[-0.5(\frac{\ln(\frac{x}{x_0})}{b})^2]$
	WeiBull, 4 Parameter	$y = a(\frac{c-1}{c})^{\frac{1-c}{c}} [\frac{x-x_0}{b} + (\frac{c-1}{c})^{\frac{1}{c}}]^{c-1} c^{-[\frac{x-x_0}{b} + (\frac{c-1}{c})^{\frac{1}{c}}]^{c-1}} + \frac{c-1}{c}$
	WeiBull, 5 Parameter	$y = y_0 + a(\frac{c-1}{c})^{\frac{1-c}{c}} [\frac{x-x_0}{b} + (\frac{c-1}{c})^{\frac{1}{c}}]^{c-1} c^{-[\frac{x-x_0}{b} + (\frac{c-1}{c})^{\frac{1}{c}}]^{c-1}} + \frac{c-1}{c}$

گروه مدل ها	نام مدل	مدل ریاضی
Sigmoid	Sigmoid, 3 Parameter	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$
	Sigmoid, 4 Parameter	$y = y_0 + \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$
	Sigmoid, 5 Parameter	$y = y_0 + \frac{a}{[1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}]^c}$
	Logistic, 3 Parameter	$y = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b}$
	Logistic, 4 Parameter	$y = y_0 + \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b}$
	Weibull, 4 Parameter	$y = a[1 - c^{-\left(\frac{x-x_0+b\ln 2^{\frac{1}{c}}}{b}\right)^{\frac{1}{c}}}]$
	Weibull, 5 Parameter	$y = y_0 + a[1 - c^{-\left(\frac{x-x_0+b\ln 2^{\frac{1}{c}}}{b}\right)^{\frac{1}{c}}}]$
	Gompertz, 3 Parameter	$y = a \cdot e^{-e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$
	Gompertz, 4 Parameter	$y = y_0 + a \cdot e^{-e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$
	Hill, 3 Parameter	$y = \frac{ax^b}{c^b + x^b}$
	Hill, 4 Parameter	$y = y_0 + \frac{ax^b}{c^b + x^b}$
	Chapman, 3 Parameter	$y = a(1 - e^{-bx})^c$
	Chapman, 4 Parameter	$y = y_0 + a(1 - e^{-bx})^c$
Exponential Decay	Single, 2 Parameter	$y = a \cdot e^{-bx}$
	Single, 3 Parameter	$y = y_0 + a \cdot e^{-bx}$
	Double, 4 Parameter	$y = a \cdot e^{-bx} + c \cdot e^{-dx}$
	Double, 5 Parameter	$y = y_0 + a \cdot e^{-bx} + c \cdot e^{-dx}$
	Triple, 6 Parameter	$y = a \cdot e^{-bx} + c \cdot e^{-dx} + g \cdot e^{-hx}$
	Triple, 7 Parameter	$y = y_0 + a \cdot e^{-bx} + c \cdot e^{-dx} + g \cdot e^{-hx}$
	Modified Single, 3 Parameter	$y = a \cdot e^{\left(\frac{b}{x+c}\right)}$
	Exponential Liner Combination	$y = a \cdot e^{-bx} + c \cdot x$

گروه مدل‌ها	نام مدل	مدل ریاضی
Exponential Rise to Maximum	Single, 2 Parameter	$y = a(1 - e^{-bx})$
	Single, 3 Parameter	$y = y_0 + a(1 - e^{-bx})$
	Double, 4 Parameter	$y = a(1 - e^{-bx}) + c(1 - e^{-dx})$
	Double, 5 Parameter	$y = y_0 + a(1 - e^{-bx}) + c(1 - e^{-dx})$
	Simple Exponent, 2 Parameter	$y = a(1 - b^x)$
	Simple Exponent, 3 Parameter	$y = y_0 + a(1 - b^x)$
Exponential Growth	Single, 1 Parameter	$y = e^{ax}$
	Single, 2 Parameter	$y = a.e^{bx}$
	Single, 3 Parameter	$y = y_0 + a.e^{bx}$
	Double, 4 Parameter	$y = a.e^{bx} + c.e^{dx}$
	Double, 5 Parameter	$y = y_0 + a.e^{bx} + c.e^{dx}$
	Modified Single, 1 Parameter	$y = a.e^{ax}$
	Modified Single, 2 Parameter	$y = a.e^{a(x-x_0)}$
	Stirling Model	$y = y_0 + \frac{a(e^{bx} - 1)}{b}$
	Simple Exponent, 2 Parameter	$y = a.b^x$
	Simple Exponent, 3 Parameter	$y = y_0 + a.b^x$
	Modified Simple Exponent, 2 Parameter	$y = y_0 + (\log a)a^x$

گروه مدل ها	نام مدل	مدل ریاضی
Hyperbola	Single Rectangular, 2 Parameter	$y = \frac{ax}{b+x}$
	Single Rectangular I, 3 Parameter	$y = y_0 + \frac{ax}{b+x}$
	Single Rectangular II, 3 Parameter	$y = \frac{ax}{b+x} + cx$
	Double Rectangular, 4 Parameter	$y = \frac{ax}{b+x} + \frac{cx}{d+x}$
	Double Rectangular, 5 Parameter	$y = \frac{ax}{b+x} + \frac{cx}{d+x} + ex$
	Hyperbolic Decay, 2 Parameter	$y = \frac{ab}{b+x}$
	Hyperbolic Decay, 3 Parameter	$y = y_0 + \frac{ab}{b+x}$
	Modified Hyperbola I	$y = \frac{ax}{1+bx}$
	Modified Hyperbola II	$y = \frac{x}{a+bx}$
	Modified Hyperbola III	$y = a - \frac{b}{(1+cx)^{\frac{1}{d}}}$
Waveform	Sine, 3 Parameter	$y = a \cdot \sin\left(\frac{2\mu x}{b} + c\right)$
	Sine, 4 Parameter	$y = y_0 + a \cdot \sin\left(\frac{2\mu x}{b} + c\right)$
	Sine Squared, 3 Parameter	$y = a[\sin\left(\frac{2\mu x}{b} + c\right)]^2$
	Sine Squared, 4 Parameter	$y = y_0 + a[\sin\left(\frac{2\mu x}{b} + c\right)]^2$
	Damped Sine, 4 Parameter	$y = a \cdot e^{-\left(\frac{x}{d}\right)}[\sin\left(\frac{2\mu x}{b} + c\right)]$
	Damped Sine, 5 Parameter	$y = y_0 + a \cdot e^{-\left(\frac{x}{d}\right)}[\sin\left(\frac{2\mu x}{b} + c\right)]$
	Modified Sine	$y = a \cdot \sin\left(\frac{\mu(x-x_0)}{b}\right)$
	Modified Sine Squared	$y = a[\sin\left(\frac{\mu(x-x_0)}{b}\right)]^2$
	Modified Damped Sine	$y = a \cdot e^{-\left(\frac{x}{c}\right)} \cdot \sin\left(\frac{\mu(x-x_0)}{b}\right)$

گروه مدل ها	نام مدل	مدل ریاضی
Power	2 Parameter	$y = y_0 + a.x^b$
	3 Parameter	$y = a.x^b$
	Pareto Function	$y = 1 - \frac{1}{x^a}$
	Symmetric, 3 Parameter	$y = a x - x_0 ^b$
	Symmetric, 4 Parameter	$y = y_0 + a x - x_0 ^b$
	2 Parameter Modified I	$y = a.(1 - x^{-b})$
	2 Parameter Modified II	$y = a.(1 + x)^b$
	Modified Pareto Function	$y = 1 - \frac{1}{(1 + ax)^b}$
Rational	1 Parameter I	$y = \frac{1}{x + a}$
	1 Parameter II	$y = \frac{1}{1 + ax}$
	2 Parameter I	$y = \frac{1}{a + bx}$
	2 Parameter II	$y = \frac{a}{1 + bx}$
	3 Parameter I	$y = \frac{a + bx}{1 + cx}$
	3 Parameter II	$y = \frac{1 + ax}{b + cx}$
	3 Parameter III	$y = \frac{a + bx}{c + x}$
	3 Parameter IV	$y = \frac{a + x}{b + cx}$
	4 Parameter	$y = \frac{a + bx}{1 + cx + dx^2}$
	5 Parameter	$y = \frac{a + bx + cx^2}{1 + dx + ex^2}$
	6 Parameter	$y = \frac{a + bx + cx^2}{1 + dx + ex^2 + fx^3}$
	7 Parameter	$y = \frac{a + bx + cx^2 + dx^3}{1 + ex + fx^2 + gx^3}$
	8 Parameter	$y = \frac{a + bx + cx^2 + dx^3}{1 + ex + fx^2 + gx^3 + hx^4}$
	9 Parameter	$y = \frac{a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4}{1 + fx + gx^2 + hx^3 + ix^4}$
	10 Parameter	$y = \frac{a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4}{1 + fx + gx^2 + hx^3 + ix^4 + jx^5}$
	11 Parameter	$y = \frac{a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5}{1 + gx + hx^2 + ix^3 + jx^4 + kx^5}$

گروه مدل‌ها	نام مدل	مدل ریاضی
Logarithm	2 Parameter I	$y = y_0 + a \cdot \ln x$
	2 Parameter II	$y = a \cdot \ln(x - x_0)$
	2 Parameter III	$y = \ln(a - bx)$
	3 Parameter	$y = y_0 + a \ln(x - x_0)$
	2 nd Order	$y = y_0 + a \cdot \ln x + b(\ln x)^2$
	3 rd Order	$y = y_0 + a \cdot \ln x + b(\ln x)^2 + c(\ln x)^3$

در بررسی مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون از آنجا که ضریب همبستگی به تنهایی نمی‌تواند نشان دهنده انتخاب مدل بهینه باشد به همین دلیل در این تحقیق حداقل مجموع مربعات خطا نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل‌سازی‌های صورت گرفته موارد زیر بررسی شدند.

- مقایسه بین مدل‌های پیشین و جدید
- بررسی انواع مختلف مدل‌های پیشین
- بررسی گروه‌های مختلف مدل‌های سینتیکی جدید
- بررسی مرتبه سینتیکی فلوتاسیون
- بررسی تعداد پارامترهای مختلف مدل سینتیکی
- انتخاب بهترین مدل از لحاظ بیشترین میزان ضریب همبستگی و یا حداقل مجموع مربعات خطا

۴-۲- نتایج مدل‌سازی و تعیین مدل بهینه

از بین ۳۵ مدل پیشین ۸ مدل نسبت به سایر مدل‌ها حداقل مجموع مربعات کمتری داشته که در جدول (۴-۲) ارائه شده است. در این جدول مدل مرتبه اول کلاسیک نیز با وجود حداقل مجموع مربعات نامناسب و به دلیل اینکه در بسیاری از تحقیقات توصیه شده، ارائه شده است.

جدول ۴-۲- مناسب‌ترین مدل‌های پیشین از لحاظ حداقل مجموع مربعات خطا

Run	Classic first-order	Secend-order	Rectangular first-order	Rectangular second-order	Fast & Slow kinetics	General Form	Gama distribution	Perfect Mixing	Sinusoidal
Run 1	58.5033	2.1946	4.8765	11.6824	2.4388	1.1669	1.1669	2.1946	1.6237
Run 2	40.9512	5.1551	2.9112	17.4756	2.8778	1.6807	1.6807	5.1551	3.3596
Run 3	58.7994	3.3593	11.9983	7.6575	6.3212	3.3534	3.3531	3.3593	5.4503
Run 4	31.3753	19.9752	9.0133	35.5013	3.0434	11.7767	11.7767	19.9752	11.0466
Run 5	32.1141	18.3031	5.3868	36.5970	0.6158	8.5732	8.5732	18.3031	9.5836
Run 6	35.8379	5.3832	4.3349	15.0633	0.9952	3.0766	3.0766	5.3832	1.4229
Run 7	66.7239	1.1742	8.1492	6.6678	2.6905	1.1374	1.1374	1.1742	1.9472
Run 8	77.5781	8.7513	21.5814	13.6582	5.9580	8.7501	8.7500	8.7513	12.2086
Run 9	54.0449	2.8250	5.4573	12.2602	1.1906	1.6908	1.6908	2.8250	1.0471
Run 10	70.9276	4.6473	10.8180	11.0863	0.8250	4.5717	4.5717	4.6473	2.7670
Run 11	26.1277	10.8961	0.7283	27.9744	0.2364	1.8801	1.8975	10.8961	3.9500
Run 12	49.9845	58.0688	29.1520	89.0182	20.8817	32.9996	32.9996	58.0688	41.7198
Run 13	45.0923	1.9656	5.9993	9.5461	2.3909	1.094	1.0945	1.9656	2.1256
Run 14	54.0868	1.8834	9.7223	7.6837	2.7951	1.659	1.6585	1.8834	4.0691
Run 15	50.0291	3.1496	6.8232	12.2952	2.9074	1.772	1.7718	3.1496	4.0011
Run 16	37.8574	6.4448	5.4401	18.8401	2.7948	2.524	2.5242	6.4448	5.3880
Run 17	29.2267	9.4044	0.8024	26.9517	1.0633	0.715	0.7147	9.4044	4.1707
Run 18	50.6726	3.6781	3.9332	14.8453	0.4846	1.738	1.7375	3.6781	0.6690
Run 19	59.4137	1.7863	10.0148	6.5221	0.5907	1.770	1.7699	1.7863	1.9170
Run 20	47.0422	1.2418	5.7428	9.3386	0.0916	0.323	0.3234	1.2418	0.9476
Run 21	56.6481	2.8694	9.1879	11.4564	3.0813	2.005	2.0050	2.8694	4.7052
Run 22	54.0289	0.2036	8.9845	5.2114	0.4094	0.132	0.1310	0.2036	2.1694
Run 23	28.8445	8.6013	1.0008	23.9779	0.3649	1.659	1.6595	8.6013	2.3762
Run 24	21.6449	10.7856	1.7378	26.0087	1.6453	2.276	2.2756	10.7856	3.9819
Run 25	59.7347	4.1111	10.7907	10.8209	4.1128	3.867	3.8672	4.1111	4.0216
Run 26	42.1818	13.4842	9.0270	26.4462	5.8655	9.341	9.3409	13.4842	6.9836
Run 27	35.3416	9.4609	4.3850	22.1514	0.9438	5.215	5.2152	9.4609	2.7240
Run 28	56.0859	1.8714	10.4753	6.4276	0.5359	1.859	1.8591	1.8714	2.4832
Run 29	35.8949	7.1926	2.2883	21.4744	0.7148	2.197	2.1973	7.1926	1.6241
Run 30	33.7372	4.0631	2.9158	14.0061	0.4577	1.561	1.5613	4.0631	0.5830
Run 31	35.5423	4.4827	1.6118	17.0472	0.4132	0.604	0.6043	4.4827	0.8578
Run 32	56.1121	0.7038	10.5806	4.5866	0.9176	0.703	0.7030	0.7038	3.1158
Run 33	42.7874	6.8519	1.9851	21.6375	1.2470	2.060	2.0598	6.8519	2.7776
Run 34	81.0848	7.5946	18.1420	10.8227	1.6728	7.384	7.3842	7.5946	6.5346
Run 35	85.6994	5.1153	20.0388	6.4568	0.2825	5.175	4.3528	5.1153	6.1937
Run 36	89.7283	5.3041	28.8910	0.4853	0.2687	7.52	0.4502	5.3041	13.9599
Run 37	126.4961	11.2930	42.8604	2.0344	0.2556	3.503	11.5040	11.2930	20.9267
Run 38	118.7836	7.0341	27.1727	2.3195	0.2796	5.973	1.9897	7.0341	9.9823
Run 39	124.6917	8.0808	35.3075	1.8781	3.0961	14.425	1.9728	8.0808	14.9768
Run 40	53.4261	1.7001	5.4768	9.6008	2.8895	0.982	0.9821	1.7001	1.8671
Run 41	130.6978	11.5627	41.9852	2.5657	1.8529	7.217	1.3256	11.5627	19.3713

Run	Classic first-order	Secend-order	Rectangular first-order	Rectangular second-order	Fast & Slow kinetics	General Form	Gama distribution	Perfect Mixing	Sinusoidal
Run 42	54.4280	2.9681	3.7540	14.3142	0.8138	1.147	1.1470	2.9681	0.7377
Run 43	67.8350	1.7540	10.8401	7.0326	4.4014	1.726	1.7259	1.7540	3.9220
Run 44	55.4601	1.0963	7.6104	6.9526	1.7471	0.944	0.9441	1.0963	1.3634
Run 45	78.6824	2.0047	15.4152	3.7018	1.4384	1.498	1.4981	2.0047	3.8750
Run 46	41.7005	6.7487	3.6275	18.9445	0.3850	3.591	3.5906	6.7487	1.7279
Run 47	67.8942	0.7907	10.7348	6.2547	2.6206	0.754	0.7536	0.7907	3.0891
Run 48	59.1401	2.4576	6.3332	10.8337	0.7087	1.860	1.8597	2.4576	0.8780
Run 49	74.7512	3.1217	21.0580	1.7534	0.4858	1.364	1.3635	3.1217	8.9791
Run 50	49.4526	12.8167	6.6479	27.3110	3.4438	8.451	8.4511	12.8167	6.8708
Run 51	37.1077	8.1541	2.3434	23.3730	3.0859	2.274	2.2740	8.1541	4.9039
Run 52	56.2564	1.4419	8.1204	7.3890	0.1966	1.306	1.3063	1.4419	0.8286
Run 53	51.9089	0.8530	11.0775	4.0169	1.7067	0.849	0.8493	0.8530	4.1891
Run 54	43.3197	8.5422	3.9092	20.9958	0.3962	5.183	5.1832	8.5422	4.7104
Run 55	90.4911	8.7809	26.4549	6.3933	0.7676	7.310	5.8694	8.7809	11.0556
Run 56	133.6162	12.6795	46.1893	2.2223	1.8630	8.476	0.3421	12.6795	23.3034
Run 57	86.7344	2.9868	23.3189	0.4051	0.7200	0.239	0.2385	2.9868	8.8079
Run 58	92.3951	8.1215	19.8134	10.9012	0.6808	7.708	7.7078	8.1215	6.7458
Run 59	116.3874	10.2264	31.2453	6.8999	0.1289	8.433	6.2311	10.2264	12.2670
Run 60	94.0807	4.4663	21.1925	4.9158	0.7939	4.195	4.2149	4.4657	6.9986
Run 61	75.0955	2.6710	17.0381	3.2313	0.2946	1.797	1.7973	2.6710	4.8311
Run 62	125.6201	10.0420	35.2694	1.7919	0.8121	12.024	0.6907	10.0420	15.0739
Run 63	129.0190	10.0649	41.4629	1.2298	0.8889	4.985	0.4125	10.0649	19.4018
Run 64	137.1274	11.8454	44.2565	1.9975	1.5652	11.539	0.6920	11.8454	20.7536
Average	65.0638	6.8326	13.6788	12.9835	1.9132	4.3057	3.3571	6.8326	6.6710

همانطور که ملاحظه می‌شود مدل مرتبه اول کلاسیک نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده حداقل مجموع مربعات نامناسبتر و همبستگی کمتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. از بین مدل‌های پیشین ارائه شده مدل سینتیکی تند و کند بیشترین همبستگی را با نتایج آزمایشگاهی دارد.

در ادامه، مدل‌های جدید با کمک نرم‌افزار سیگماپلات مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش از بین ۱۰۵ مدل مورد بررسی ۸ مدل با بیشترین همبستگی به نتایج آزمایشگاهی در جدول (۳-۴) ارائه شده است.

جدول ۴-۳- مناسب‌ترین مدل‌های جدید از لحاظ حداقل مجموع مربعات خطا

Run	Sigmoidal, Logistic, 4 Parameter	Sigmoidal, Weibull, 5 Parameter	Exponential Decay, Double, 5 Parameter	Exponential Decay, Triple, 7 Parameter	Exponential Rise to Maximum, Double, 4 Parameter	Exponential Rise to Maximum, Double, 5 Parameter	Hyperbola, Double Rectangular, 5 Parameter	Hyperbola, Modified Hyperbola III
Run 1	1.0028	2.1494	2.4187	0.0035	2.4388	2.4186	1.9021	1.1661
Run 2	1.9344	3.0673	2.8294	0.1416	2.8778	2.8294	3.1031	1.6804
Run 3	3.3577	4.5599	2.2441	0.7277	6.3212	6.2441	3.3305	3.3517
Run 4	9.4616	14.3757	3.0430	3.2142	3.0434	3.0433	17.1123	11.6974
Run 5	5.0141	8.1739	0.6081	0.6081	0.6141	0.6081	14.9332	8.4716
Run 6	2.0956	4.1870	0.9938	0.9938	0.9952	0.9938	4.2493	3.0270
Run 7	1.0932	35.2289	2.6722	0.0119	2.6905	2.6722	1.1357	1.1368
Run 8	8.6975	4.2167	5.8757	5.8757	5.9580	5.8757	7.6977	8.7214
Run 9	1.4607	2.9329	1.1697	0.4233	1.1906	1.1697	2.3179	1.6883
Run 10	4.2279	3.7600	0.8240	0.8240	0.8250	0.8240	4.5580	4.5519
Run 11	0.3432	1.3661	0.2335	0.2335	0.2364	0.2335	5.1835	1.8296
Run 12	15.6955	0.3909	20.2852	20.2852	20.8817	20.2852	47.8878	32.5004
Run 13	1.3740	1.9225	2.3314	0.0567	2.3909	2.3314	1.2558	1.0852
Run 14	1.8371	1.3467	2.7638	0.0674	2.7951	2.7638	0.3990	1.6295
Run 15	2.3700	1.3398	2.8989	0.0448	2.9074	2.8989	1.0137	1.7539
Run 16	3.7672	1.9300	2.7944	1.1222	2.7948	2.7944	2.3689	2.4980
Run 17	1.2577	1.6043	1.0379	0.2726	1.0633	1.0379	2.7936	0.7144
Run 18	0.8716	0.6671	0.4846	0.3034	0.4846	0.4846	2.8736	1.7140
Run 19	1.6876	2.1232	0.5895	0.5895	0.5907	0.5895	1.7845	1.7612
Run 20	0.3152	0.6072	0.0090	0.0429	0.0916	0.0900	0.3800	0.3226
Run 21	2.4733	1.5030	3.0754	0.0512	3.0813	3.0754	1.3138	1.9790
Run 22	0.1657	0.3706	0.4003	0.0029	0.4094	0.4003	0.0421	0.1292
Run 23	0.1791	0.7365	0.3558	0.3558	0.3649	0.3558	4.1146	1.5963
Run 24	1.0438	0.7745	1.6250	1.6038	1.6453	1.6250	4.5507	2.1879
Run 25	3.5687	2.5126	4.1126	2.9619	4.1128	4.1126	4.0792	3.8444
Run 26	5.5146	1.2797	5.5452	5.5452	5.8655	5.5452	11.3846	8.9774
Run 27	2.3318	2.7355	0.8736	0.8736	0.9438	0.8736	7.7417	5.0049
Run 28	1.6504	0.1946	0.5208	0.5208	0.5359	0.5208	1.8554	1.8047
Run 29	0.7656	1.3103	0.7119	0.6882	0.7148	0.7119	4.2849	2.1279
Run 30	1.0128	2.6333	0.4443	0.2599	0.4577	0.4443	2.7295	1.5404
Run 31	0.3627	1.6051	0.3980	0.0392	0.4132	0.3980	1.9946	0.5985
Run 32	0.6988	1.1015	0.9003	0.2695	0.9176	0.9003	0.2822	0.6991
Run 33	0.9378	0.4757	1.2461	0.8231	1.2470	1.2461	4.2052	2.0428
Run 34	7.5362	1.1155	1.6569	1.6569	1.6728	1.6569	6.2365	7.3054
Run 35	4.9581	2.0799	0.2807	0.2807	0.2825	0.2807	3.2035	4.2915
Run 36	0.5510	0.1115	0.2671	0.0673	0.2687	0.2671	0.0695	0.4502
Run 37	1.0945	0.1093	0.2552	0.0281	0.2556	0.2552	0.2201	0.6465
Run 38	2.9045	0.0658	0.2792	0.0250	0.2796	0.2792	1.2023	1.9876
Run 39	1.5347	13.6061	3.0839	0.7485	3.0961	3.0839	1.4499	1.9707
Run 40	1.0319	23.2042	2.8676	0.0327	2.8895	2.8676	1.3864	0.9819
Run 41	1.9811	1.8056	1.8341	0.4262	1.8529	1.8341	1.0146	1.3254

Run	Sigmoidal, Logistic, 4 Parameter	Sigmoidal, Weibull, 5 Parameter	Exponential Decay, Double, 5 Parameter	Exponential Decay, Triple, 7 Parameter	Exponential Rise to Maximum, Double, 4 Parameter	Exponential Rise to Maximum, Double, 5 Parameter	Hyperbola, Double Rectangular, 5 Parameter	Hyperbola, Modified Hyperbola III
Run 42	0.6439	1.5138	0.8032	0.0066	0.8138	0.8032	2.2659	1.1399
Run 43	1.7452	26.4921	4.3944	0.2961	4.4014	4.3944	1.7516	1.7248
Run 44	0.8934	2.1956	1.7051	0.0158	1.7471	1.7051	1.0859	0.9437
Run 45	1.7755	0.7697	1.4359	0.4501	1.4384	1.4359	1.0190	1.4889
Run 46	1.7328	1.3717	0.3728	0.3728	0.3850	0.3728	5.5514	3.5134
Run 47	0.7862	12.1839	2.6070	0.0008	2.6206	2.6070	0.3992	0.7491
Run 48	1.4739	2.5141	0.6942	0.0974	0.7087	0.6942	2.3874	1.8511
Run 49	1.6652	1.4741	0.4849	0.4849	0.4858	0.4849	1.0196	1.3608
Run 50	5.5012	0.0826	3.4028	3.4028	3.4438	3.4028	11.2609	8.3858
Run 51	1.8685	2.3148	3.0819	1.0195	3.0859	3.0819	4.7730	2.2694
Run 52	1.0164	0.8933	0.1962	0.1009	0.1966	0.1962	1.4417	1.8133
Run 53	0.7820	1.0123	1.6619	0.0674	1.7067	1.6619	0.1907	0.8274
Run 54	3.6515	4.1775	0.3942	0.3108	0.3962	0.3942	7.7503	5.1626
Run 55	7.3332	2.7689	0.7590	0.7590	0.7676	0.7590	4.1640	5.8179
Run 56	0.1098	0.2027	1.8548	0.0409	1.8630	1.8548	0.1023	0.3409
Run 57	0.4678	0.6639	0.7064	0.0366	0.7200	0.7064	0.1498	0.2384
Run 58	8.0988	1.5380	0.6679	0.6679	0.6808	0.6679	6.3730	7.6561
Run 59	8.0010	1.6787	0.1284	0.1284	0.1289	0.1284	3.5984	6.1990
Run 60	1.9097	0.1978	0.7939	0.4557	0.7939	0.7939	1.1124	1.4622
Run 61	2.2706	1.5005	0.2911	0.1641	0.2946	0.2911	1.1397	1.7776
Run 62	1.2858	0.3690	0.8096	0.0748	0.8121	0.8096	0.1612	0.6904
Run 63	0.2397	0.0429	0.8857	0.0173	0.8889	0.8857	0.0356	0.4119
Run 64	0.6381	0.5714	1.5581	0.2324	1.5652	1.5581	0.2915	0.6916
Average	2.5633	3.4658	1.8208	0.9735	1.9132	1.8846	3.8698	3.1142

همانطور که ملاحظه می‌شود، مدل‌های گروه سیگموئیدال، اکسپوننشال و هایپربول نسبت به سایر

گروه‌ها همبستگی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارند.

در نهایت می‌توان گفت از بین این مدل‌ها و مدل‌های پیشین نیز مدل ۷ پارامتری ۳ گانه نمایی

نزولی^۱ مطابق فرمول (۱-۴) با کمترین حداقل مجموع مربعات به عنوان بهترین مدل انتخاب شد و از جدول

(۱-۴) داریم:

$$R=R_{\infty}[Z_1(1 - e^{k_1t}) + Z_2(1 - e^{k_2t}) + Z_3(1 - e^{k_3t})] \quad (1-4)$$

^۱ Exponential Decay, triple, 7 Parameter

که در آن

k_1, k_2 و k_3 : به ترتیب ثابت سینتیک ذرات شناور شونده تند، متوسط و کند

R_∞ : بازیابی بینهایت

Z_1, Z_2 و Z_3 : به ترتیب جزء شناور شونده تند، متوسط و کند

حال با دستیابی به بهترین مدل سینتیکی پارامترهای این مدل از نرم افزار سیگماپلات برای هر

آزمایش استخراج و در جدول (۴-۴) ارائه شده است.

جدول ۴-۴- پارامترهای مدل سینتیکی آزمایش‌های مختلف با روش CCD

Run	Z_1	Z_2	Z_3	k_1	k_2	k_3	R_∞	SS	R^2
R1	21.88	59.77	18.36	3.76	0.95	0.09	84.78	0.0035	1.0000
R2	10.91	71.24	17.85	17.83	0.96	0.11	79.22	0.1416	1.0000
R3	1.78	7.08	91.14	3.91	0.66	0.001	88.76	0.7277	0.9999
R4	30.55	29.85	39.60	0.78	0.78	0.02	93.48	3.2142	0.9994
R5	35.56	34.75	29.69	0.97	0.97	0.04	92.83	0.6081	0.9999
R6	33.72	30.96	35.33	0.83	0.83	0.14	79.20	0.9938	0.9998
R7	22.81	57.33	19.86	4.13	0.97	0.09	82.47	0.0119	1.0000
R8	43.80	26.47	29.73	1.47	0.27	0.27	82.74	5.8757	0.9991
R9	6.27	66.67	27.06	18.38	1.04	0.16	80.25	0.4233	0.9999
R10	35.55	33.39	31.06	1.40	1.40	0.17	81.08	0.8240	0.9998
R11	37.00	35.89	27.11	0.98	0.98	0.18	77.40	0.2335	1.0000
R12	41.33	41.08	17.59	1.24	1.24	0.11	86.30	2.2852	0.9996
R13	8.45	66.00	25.54	30.48	0.76	0.13	78.08	0.0567	1.0000
R14	10.33	61.91	27.76	30.48	0.75	0.16	78.98	0.0674	1.0000
R15	13.45	67.29	19.26	21.36	0.81	0.15	78.39	0.0448	1.0000
R16	15.38	66.83	17.80	2.72	0.53	0.04	88.59	1.1222	0.9997
R17	9.37	70.54	20.10	3.01	0.76	0.14	82.21	0.2726	1.0000
R18	53.06	28.19	18.76	1.46	0.50	0.11	81.64	0.3034	0.9999
R19	31.78	27.08	41.14	1.23	1.23	0.20	76.49	0.5895	0.9999
R20	15.33	59.38	25.29	47.51	1.07	0.23	79.85	0.0429	1.0000
R21	7.58	28.53	63.89	3.41	0.56	0.00	89.46	0.0512	1.0000
R22	4.87	51.41	43.72	7.31	0.99	0.21	78.44	0.0029	1.0000
R23	35.10	33.46	31.44	0.94	0.94	0.18	78.42	0.3558	0.9999
R24	52.17	31.49	16.34	0.87	0.34	0.08	80.24	1.6038	0.9996
R25	28.34	45.35	26.31	1.77	0.53	0.04	90.71	2.9619	0.9995
R26	33.45	31.08	35.48	0.91	0.91	0.16	79.36	5.5452	0.9992
R27	35.59	33.80	30.61	0.82	0.82	0.10	82.51	0.8736	0.9998
R28	54.24	42.50	3.26	1.04	0.18	0.03	81.50	0.5208	0.9999

Run	Z ₁	Z ₂	Z ₃	k ₁	k ₂	k ₃	R _∞	SS	R ²
R29	36.03	36.09	27.87	1.09	0.66	0.13	83.59	0.6882	0.9999
R30	2.85	66.99	30.15	3.86	0.75	0.11	80.27	0.2599	1.0000
R31	5.57	67.44	26.99	3.66	0.84	0.15	79.91	0.0392	1.0000
R32	47.45	50.38	2.17	1.30	0.25	0.03	78.22	0.2695	1.0000
R33	33.69	20.35	45.95	1.65	0.45	0.00	77.28	0.8231	0.9998
R34	34.13	31.41	34.47	1.25	1.25	0.13	81.82	1.6569	0.9996
R35	32.63	28.44	38.94	1.13	1.13	0.13	85.49	0.2807	1.0000
R36	23.69	27.84	48.47	2.02	0.78	0.18	78.75	0.0673	1.0000
R37	40.31	25.61	34.08	2.02	0.46	0.15	81.11	0.0281	1.0000
R38	58.09	17.00	24.91	2.44	0.63	0.16	82.74	0.0250	1.0000
R39	15.44	47.10	37.45	15.76	1.23	0.21	82.09	0.7485	0.9998
R40	16.18	65.08	18.74	5.97	0.95	0.10	78.89	0.0327	1.0000
R41	9.63	49.81	40.55	15.20	1.22	0.16	82.41	0.4262	0.9999
R42	9.79	22.08	68.14	3.53	0.69	0.003	84.78	0.0066	1.0000
R43	21.71	50.49	27.80	3.63	0.71	0.02	82.05	0.2961	1.0000
R44	9.15	64.53	26.32	6.52	0.90	0.12	78.71	0.0158	1.0000
R45	38.00	37.04	24.96	1.91	0.53	0.05	86.51	0.4501	0.9999
R46	36.10	34.48	29.41	1.08	1.08	0.15	78.13	0.3728	0.9999
R47	18.08	60.52	21.40	4.39	0.78	0.13	82.11	0.0008	1.0000
R48	5.45	67.57	26.98	11.34	1.13	0.15	81.18	0.0974	1.0000
R49	47.36	23.49	29.16	1.19	0.19	0.19	79.40	0.4849	0.9999
R50	38.59	36.35	25.05	1.48	1.48	0.20	78.55	3.4028	0.9994
R51	9.14	13.16	77.70	2.01	0.69	0.002	77.84	1.0195	0.9997
R52	39.21	29.87	30.92	1.38	0.65	0.14	79.40	0.1009	1.0000
R53	6.80	55.37	37.83	17.42	0.72	0.16	79.63	0.0674	1.0000
R54	76.04	2.32	21.65	1.43	1.27	0.14	78.43	0.3108	0.9999
R55	33.01	25.78	41.21	1.22	1.22	0.13	78.44	0.7590	0.9998
R56	22.62	40.18	37.20	3.70	0.80	0.15	82.45	0.0409	1.0000
R57	6.68	50.58	42.74	6.76	1.05	0.17	79.73	0.0366	1.0000
R58	34.72	32.00	33.29	1.42	1.42	0.15	83.54	0.6679	0.9998
R59	33.28	29.78	36.94	1.45	1.45	0.14	85.28	0.1284	1.0000
R60	47.00	28.31	24.68	1.83	0.51	0.13	82.75	0.4557	0.9999
R61	7.61	54.42	37.97	2.57	1.02	0.14	79.51	0.1641	1.0000
R62	19.27	46.42	34.32	5.30	1.51	0.20	77.68	0.0748	1.0000
R63	28.28	33.63	38.09	3.01	0.80	0.18	81.59	0.0173	1.0000
R64	14.47	44.40	41.13	6.78	1.23	0.19	81.66	0.2324	1.0000

نتایج حاصل از این جدول به عنوان پاسخ^۱ در نرم افزار DX10 استفاده شد و تغییرات فاکتورهای

متغیر ورودی بر این پاسخها در فصل بعد بررسی خواهد شد.

^۱ Response

۴-۳- بررسی مرتبه سینتیکی فلوتاسیون

معادله کلی مدل سینتیکی مرتبه n به صورت معادله (۴-۲) می باشد (Brozek et al. 2007).

$$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + (n-1)(C_0^{n-1})kt]^{\frac{1}{n-1}}} \right\} \quad n \neq 1 \quad (4-2)$$

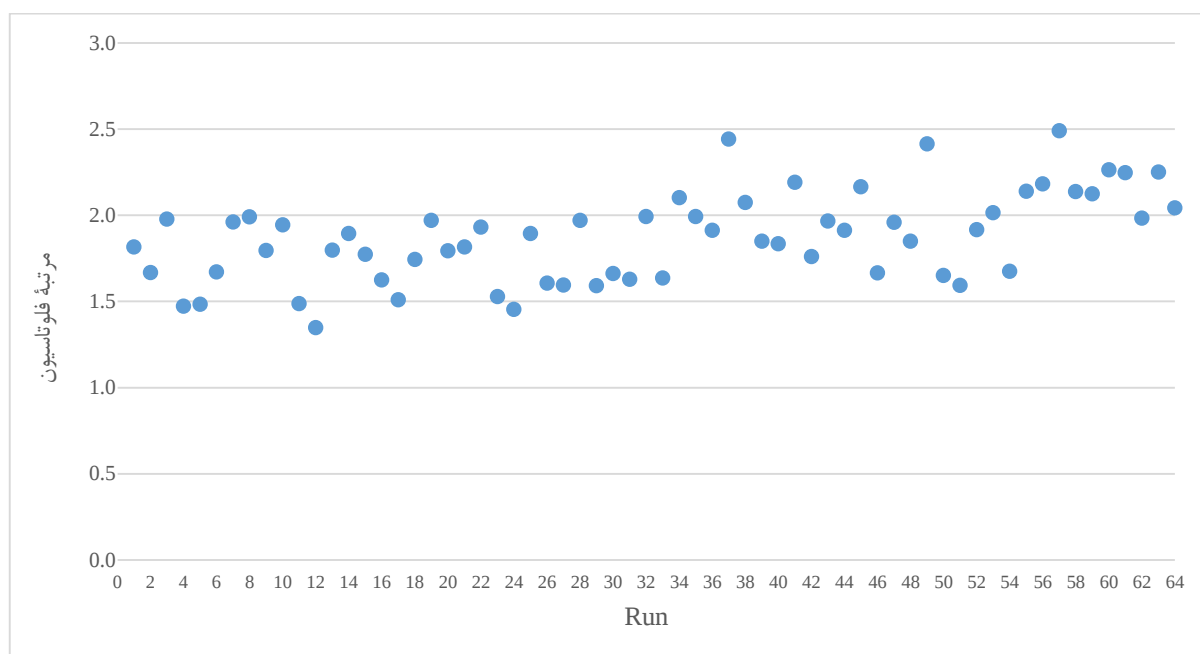
این معادله دارای ثابت سینتیک منفرد می باشد ولی مرتبه سینتیک در آن می تواند تغییر کند. با توجه به این موضوع نتایج مطالعات آزمایشگاهی با این مدل تطبیق داده شد و ثابت سینتیک، بازیابی بینهایت و مرتبه فلوتاسیون به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. در جدول (۴-۲) نتایج مدل سازی با این مدل ارائه شده است. در جدول (۴-۵) نتایج کامل مدل سازی معادله (۴-۳) ارائه شده است.

جدول ۴-۵- نتایج کامل مدل سازی معادله کلی

Run	مجدور مربعات خطا	Laboratory Test						پارامترهای مدل		
		pH	d80	Solid Content	Na ₂ S	Collector dosage	Collector Type	n	k	R _∞
Run 1	1.1669	9.0	75.0	25.0	4000.0	2500.0	507.0	1.82	0.0390	82.31
Run 2	1.6807	8.3	44.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	1.67	0.0654	77.65
Run 3	3.3534	6.9	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.98	0.0133	79.08
Run 4	11.7767	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.47	0.0925	76.25
Run 5	8.5732	8.3	64.0	27.5	2769.5	2000.0	507.0	1.48	0.1134	77.31
Run 6	3.0766	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.67	0.0336	79.36
Run 7	1.1374	7.5	53.0	30.0	7000.0	2500.0	PAX	1.96	0.0769	80.60
Run 8	8.7501	9.0	75.0	30.0	7000.0	2500.0	507.0	1.99	0.0088	89.31
Run 9	1.6908	8.3	64.0	27.5	5500.0	1089.8	507.0	1.80	0.0314	81.30
Run 10	4.5717	7.5	75.0	25.0	4000.0	1500.0	507.0	1.95	0.0184	82.52
Run 11	1.8801	7.5	53.0	25.0	4000.0	2500.0	PAX	1.49	0.0995	76.92
Run 12	32.9996	9.0	75.0	25.0	7000.0	1500.0	507.0	1.35	0.2479	82.57
Run 13	1.094	8.3	44.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.80	0.0252	79.13
Run 14	1.659	7.5	75.0	30.0	4000.0	2500.0	PAX	1.89	0.0161	82.05
Run 15	1.772	8.3	64.0	27.5	5500.0	2910.2	PAX	1.77	0.0358	79.58
Run 16	2.524	9.0	53.0	25.0	7000.0	2500.0	PAX	1.63	0.0469	82.93
Run 17	0.715	9.0	53.0	30.0	7000.0	1500.0	PAX	1.51	0.0872	81.61
Run 18	1.738	9.0	53.0	30.0	4000.0	2500.0	507.0	1.74	0.0398	80.81
Run 19	1.770	8.3	64.0	27.5	8230.5	2000.0	507.0	1.97	0.0122	80.30
Run 20	0.323	9.0	53.0	25.0	4000.0	1500.0	PAX	1.80	0.0213	83.55
Run 21	2.005	9.0	75.0	25.0	7000.0	1500.0	PAX	1.82	0.0229	86.18
Run 22	0.132	7.5	53.0	30.0	4000.0	1500.0	507.0	1.93	0.0122	83.23
Run 23	1.659	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	1.53	0.0750	78.52
Run 24	2.276	8.3	64.0	23.0	5500.0	2000.0	PAX	1.45	0.0848	77.93

Run	مجذور مربعات خطا	Laboratory Test						پارامترهای مدل		
		pH	d80	Solid Content	Na ₂ S	Collector dosage	Collector Type	n	k	R [∞]
Run 25	3.867	7.5	75.0	30.0	4000.0	2500.0	507.0	1.90	0.0168	82.33
Run 26	9.341	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	1.61	0.0474	79.48
Run 27	5.215	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	1.60	0.0496	79.23
Run 28	1.859	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	1.97	0.0094	83.46
Run 29	2.197	7.5	75.0	30.0	7000.0	1500.0	507.0	1.59	0.0525	82.94
Run 30	1.561	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.66	0.0363	79.12
Run 31	0.604	8.3	64.0	27.5	5500.0	2910.2	507.0	1.63	0.0506	79.94
Run 32	0.703	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.99	0.0094	82.52
Run 33	2.060	7.5	53.0	25.0	7000.0	1500.0	PAX	1.64	0.0755	79.57
Run 34	7.384	8.3	64.0	27.5	5500.0	1089.8	PAX	2.10	0.0077	83.19
Run 35	5.175	9.0	53.0	30.0	7000.0	1500.0	507.0	1.99	0.0097	86.48
Run 36	7.52	8.3	64.0	32.1	5500.0	2000.0	507.0	1.914	0.013	81.03
Run 37	3.503	7.5	53.0	30.0	7000.0	2500.0	507.0	2.44	0.001	88.00
Run 38	5.973	9.0	53.0	25.0	7000.0	2500.0	507.0	2.075	0.016	82.96
Run 39	14.425	9.0	75.0	30.0	4000.0	1500.0	507.0	1.850	0.029	82.03
Run 40	0.982	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.84	0.0353	77.91
Run 41	7.217	7.5	75.0	30.0	7000.0	1500.0	PAX	2.19	0.0050	85.72
Run 42	1.147	9.0	75.0	30.0	7000.0	2500.0	PAX	1.76	0.0407	82.94
Run 43	1.726	7.5	75.0	25.0	4000.0	1500.0	PAX	1.97	0.0183	81.56
Run 44	0.944	8.3	64.0	32.1	5500.0	2000.0	PAX	1.91	0.0182	79.05
Run 45	1.498	7.5	53.0	30.0	4000.0	1500.0	PAX	2.17	0.0064	82.78
Run 46	3.591	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	1.67	0.0494	77.71
Run 47	0.754	7.5	53.0	25.0	7000.0	1500.0	507.0	1.96	0.0157	83.82
Run 48	1.860	9.6	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.85	0.0266	81.64
Run 49	1.364	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	2.41	0.0011	90.50
Run 50	8.451	9.0	53.0	30.0	4000.0	2500.0	PAX	1.65	0.0770	78.37
Run 51	2.274	8.3	84.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	1.59	0.0890	77.97
Run 52	1.306	8.3	64.0	27.5	2769.5	2000.0	PAX	1.92	0.0149	81.11
Run 53	0.849	7.5	53.0	25.0	4000.0	2500.0	507.0	2.02	0.0070	85.09
Run 54	5.183	8.3	64.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.68	0.0729	76.63
Run 55	7.310	8.3	64.0	27.5	8230.5	2000.0	PAX	2.140	0.006	79.82
Run 56	8.476	7.5	75.0	25.0	7000.0	2500.0	PAX	2.183	0.005	85.01
Run 57	0.239	8.3	64.0	23.0	5500.0	2000.0	507.0	2.49	0.0010	89.36
Run 58	7.708	7.5	75.0	25.0	7000.0	2500.0	507.0	2.14	0.0075	85.66
Run 59	8.433	9.6	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	2.125	0.008	85.75
Run 60	4.195	9.0	75.0	30.0	4000.0	1500.0	PAX	2.26	0.0044	86.68
Run 61	1.797	6.9	64.0	27.5	5500.0	2000.0	507.0	2.25	0.0033	84.25
Run 62	12.024	8.3	84.0	27.5	5500.0	2000.0	PAX	1.984	0.022	77.24
Run 63	4.985	9.0	75.0	25.0	4000.0	2500.0	PAX	2.251	0.004	86.18
Run 64	11.539	9.0	53.0	25.0	4000.0	1500.0	507.0	2.043	0.011	83.17
Average	4.3057	-	-	-	-	-	-	1.87	0.0358	81.86

در شکل (۴-۱) نمودار مرتبه فلوئاسیون در آزمایش‌های مختلف ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در حالتی که مدل سینتیک فلوئاسیون منفرد باشد، مرتبه فلوئاسیون در بیشتر مواقع بین ۱/۵ تا ۲ می‌باشد. همچنین این نمودار نشان می‌دهد در شرایط مختلف آزمایش و مقادیر مختلف مواد شیمیایی مقدار مرتبه فلوئاسیون و ثابت سینتیک متفاوت خواهد بود در صورتی که در تحقیقات پیشین معمولاً برای هر نمونه یک مقدار ثابت برای این دو پارامتر در نظر گرفته می‌شود. مطابق جدول (۴-۵) و به صورت میانگین مرتبه فلوئاسیون حدود ۱/۸۷ به دست خواهد آمد که به آن شبه مرتبه دوم می‌گویند. همچنین مقدار متوسط ثابت سینتیک برای تمام آزمایش‌ها، 0.036 بر زمان بدست آمده است.

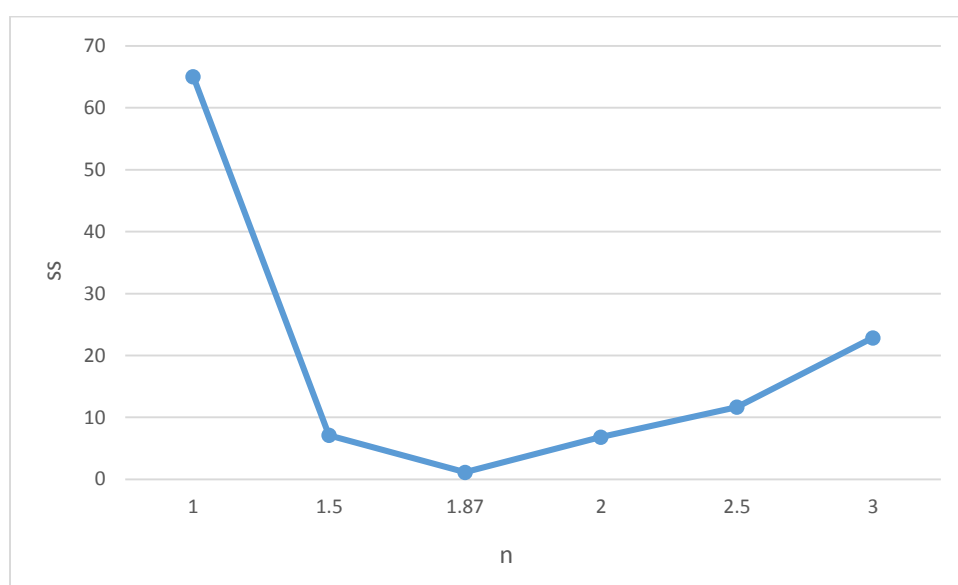


شکل ۴-۱- نمودار مرتبه فلوئاسیون در آزمایش‌های مختلف

در جدول (۴-۶) و شکل (۴-۲) نتایج مرتبه فلوئاسیون و میانگین مجموع مربعات خطا برای تمام آزمایش‌ها ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود زمانی که مرتبه فلوئاسیون ۱/۸۷ در نظر گرفته می‌شود حداقل مجموع مربعات خطا بدست می‌آید و نکته دیگر اینکه زمانی که مرتبه فلوئاسیون مطابق با بیشتر تحقیقات پیشین، ۱ در نظر گرفته می‌شود حداقل مجموع مربعات خطا معادل ۶۵ خواهد شد که نشان از عدم تطابق این مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی دارد.

جدول ۴-۶- نتایج مرتبه فلوتاسیون و میانگین مجموع مربعات خطا برای تمام آزمایش‌ها

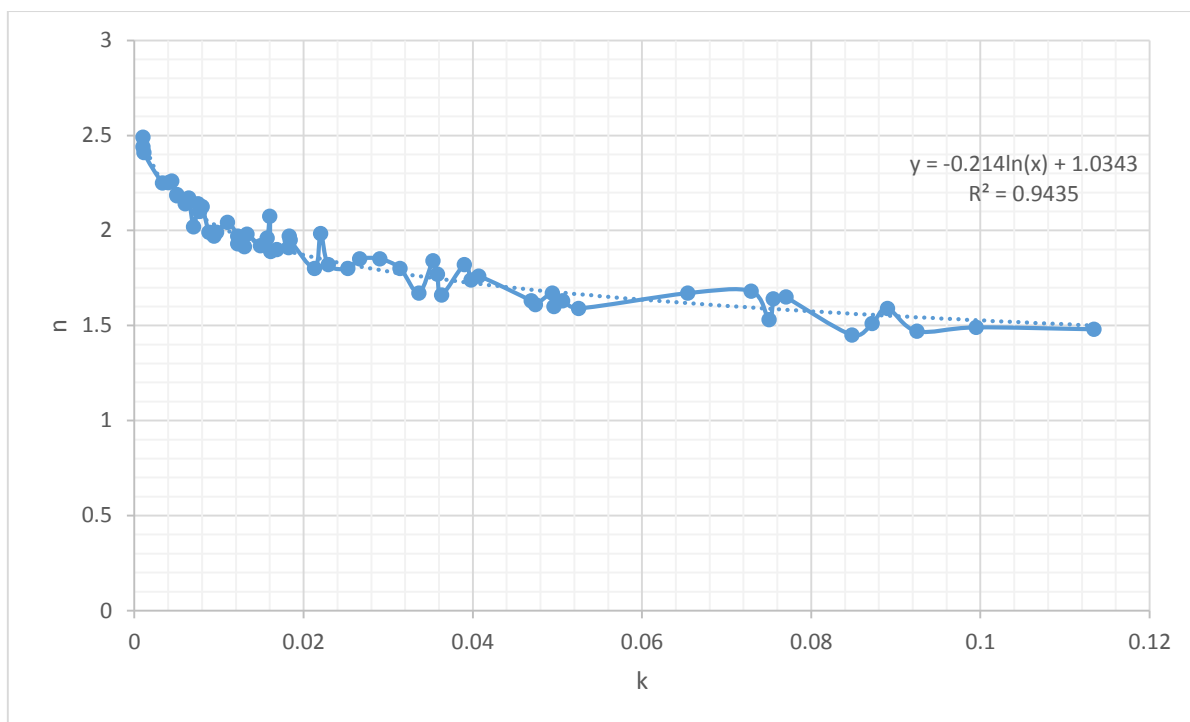
مرتبه فلوتاسیون (n)	حداقل مجموع مربعات خطا (SS)
0	9800.8
0.5	3793.7
1	65.1
1.5	7.1
1.87	1.1
2	6.8
2.5	11.7
3	22.9



شکل ۴-۲- نمودار مرتبه فلوتاسیون و مجموع مربعات خطا

در ادامه برای بررسی بیشتر و ارائه یک مدل ریاضی، رابطه بین ثابت سینتیک و مرتبه فلوتاسیون در شکل (۳-۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که این نمودار با حذف یک k که عدد آن 0.248 بوده و از مابقی اعداد با اختلاف بیشتر بود به عنوان خطا حذف شده و مابقی در نمودار شکل (۳-۴) ارائه شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، رابطه بین n و k را می‌توان مطابق معادله (۳-۴) با ضریب همبستگی حدود ۹۵ درصد ارائه داد.

$$n = -0.214 \ln(k) + 1.0343 \quad (3-4)$$



شکل ۴-۳- نمودار مرتبه فلو تاسیون و ثابت سینتیک

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش k ، n کاهش می‌یابد. مطابق معادله (۴-۲) این موضوع از لحاظ جبری نیز منطقی می‌باشد که در بازایی ثابت با افزایش k ، n کاهش یابد. همچنین از لحاظ عملیاتی با توجه به اینکه مقدار ماده قابل حمل توسط حباب‌ها ثابت است، اگر مقدار مواد قابل شناور بسیار بیشتر از ظرفیت حمل حباب‌ها باشد، سینتیک فلو تاسیون مستقل از مقدار مواد قابل شناور خواهد بود لذا مرتبه فلو تاسیون به سمت صفر می‌رود و از طرفی هر چه مقدار مواد قابل شناور کم شود مرتبه فلو تاسیون به سمت ۲ خواهد رفت. همچنین زمانی که مقدار مواد قابل شناور کم شود، احتمال برخورد کم شده و در نتیجه سینتیک فلو تاسیون کاهش می‌یابد.

۴-۴- جمع‌بندی مدل‌های فلو تاسیون

با بررسی بین مدل‌های جدید و پیشین، نتایج به شرح زیر به دست آمد:

- در مجموع مدل‌های جدید همبستگی بیشتری با مدل‌های پیشین دارند. (جداول (۴-۲) و (۴-۴)

((۳

- در بین مدل‌های پیشین و جدید مدل‌های با توزیع گسسته و چند ثابت سینتیک نتایج بهتری نسبت به مدل‌های با ثابت سینتیک منفرد، ثابت سینتیک متوسط و مدل‌های با توزیع پیوسته ارائه می‌دهند ((جداول (۲-۴) و (۳-۴)).
- زمانی که از مدل‌های سینتیکی با ثابت سینتیکی منفرد استفاده می‌شود، مرتبه‌های بالاتر از ۱ نتایج مناسب‌تری ارائه می‌کنند و همانطور که ملاحظه می‌شود مناسب‌ترین مرتبه ۱/۸۷ است ((جدول (۶-۴) و (شکل (۳-۴)).
- علاوه بر مدل‌های سینتیکی با ۳ ثابت سینتیک (k_1 , k_2 و k_3), مدل‌های با تعداد ثابت‌های سینتیکی بیشتر نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتوانستند نتایج بهتری نسبت به مدل‌های سینتیکی با ۳ ثابت سینتیکی ارائه دهند (جدول (۷-۴) همانطور که ملاحظه می‌شود، فقط ۵ آزمایش، ۱، ۷، ۱۹، ۲۲ و ۳۱ در حالت استفاده از ۴ ثابت سینتیک نتیجه بهتری به دست آمده و در بقیه آزمایش‌ها نتیجه بین ۴ و ۳ ثابت سینتیک تفاوتی وجود ندارد.
- مدل‌های سینتیکی گسسته از مرتبه‌های بالاتر از ۱ مشابه مدل‌های ارائه شده در معادله (۴-۴) نتایج نامناسب‌تری از مدل سینتیکی گسسته مرتبه اول و نتایج مشابه با مدل سینتیکی مرتبه دوم منفرد ارائه دادند ((جداول (۲-۴)، (۳-۴) و (۸-۴)). همانطور که در جدول (۸-۴) ملاحظه می‌شود، ۵ نمونه از آزمایش‌ها ارائه شده که در آن فرم گسسته برای مرتبه دوم نسبت به شکل منفرد با همان مرتبه برتری ندارد.

$$R = R_{\infty}^2 \left[\left(\frac{k_{1t}}{1 + R_{\infty} k_{1t}} \right) + \left(\frac{k_{2t}}{1 + R_{\infty} k_{2t}} \right) + \left(\frac{k_{3t}}{1 + R_{\infty} k_{3t}} \right) + \dots \right] \quad (۴-۴)$$

این معادله فرم گسسته و دارای چند ثابت سینتیک برای مدل مرتبه دوم می‌باشد. علاوه بر مرتبه دوم فرم گسسته و دارای چند ثابت سینتیک برای مرتبه ۰/۵، ۱/۵، ۱/۸۷، ۲/۵ و ۳ نیز مورد بررسی قرار گرفت که هیچ کدام نتایج بهتری نسبت به مدل گسسته ۷ پارامتری مرتبه اول ارائه ندادند.

- برای بررسی تغییرات مقدار ثابت سینتیک و مرتبه فلو تاسیون در طول زمان کف گیری بدین ترتیب اعمال شد که ابتدا برای تعیین ثابت سینتیک در زمان های مختلف از مدل مرتبه اول کلاسیک استفاده شد و برای تعیین مرتبه فلو تاسیون در زمان های مختلف از معادله کلی (معادله (۴-۲)) استفاده شد. نتایج این مدل سازی بر روی یکی از آزمایش ها در جدول (۴-۹) و شکل های (۴-۴) و (۴-۵) همچنین نتایج مدل سازی این پارامترها در معادلات (۴-۵) تا (۴-۹) ارائه شده است.

جدول ۴-۷- نتایج تعداد ثابت سینتیک از لحاظ حداقل مجموع مربعات خطا

Run	k1	k1, k2	k1, k2, k3	k1, k2, k3, k4
Run 1	58.5033	2.4187	0.0035	0.00004
Run 2	40.9512	2.8294	0.1416	0.1416
Run 3	58.7994	2.2441	0.7277	0.7277
Run 4	31.3753	3.0430	3.2142	3.2142
Run 5	32.1141	0.6081	0.6081	0.6081
Run 6	35.8379	0.9938	0.9938	0.9938
Run 7	66.7239	2.6722	0.0119	0.0006
Run 8	77.5781	5.8757	5.8757	5.8757
Run 9	54.0449	1.1697	0.4233	0.4233
Run 10	70.9276	0.8240	0.8240	0.8240
Run 11	26.1277	0.2335	0.2335	0.2335
Run 12	49.9845	20.2852	20.2852	20.2852
Run 13	45.0923	2.3314	0.0568	0.0567
Run 14	54.0868	2.7638	0.0674	0.0674
Run 15	50.0291	2.8989	0.0448	0.0448
Run 16	37.8574	2.7944	1.1222	1.1222
Run 17	29.2267	1.0379	0.2726	0.2726
Run 18	50.6726	0.4846	0.3034	0.3034
Run 19	59.4137	0.5895	0.5895	0.5567
Run 20	47.0422	0.0090	0.0429	0.0429
Run 21	56.6481	3.0754	0.0512	0.0512
Run 22	54.0289	0.4003	0.0029	0.0003
Run 23	28.8445	0.3558	0.3558	0.3558
Run 24	21.6449	1.6250	1.6038	1.6038
Run 25	59.7347	4.1126	2.9619	2.9619
Run 26	42.1818	5.5452	5.5452	5.5452
Run 27	35.3416	0.8736	0.8736	0.8736

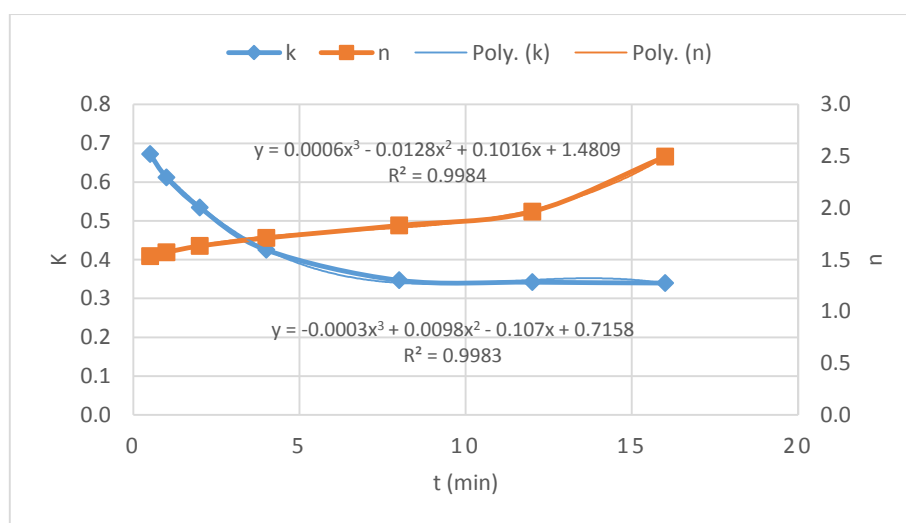
Run	k1	k1, k2	k1, k2, k3	k1, k2, k3, k4
Run 28	56.0859	0.5208	0.5208	0.5208
Run 29	35.8949	0.7119	0.6882	0.6882
Run 30	33.7372	0.4443	0.2599	0.2599
Run 31	35.5423	0.3980	0.0392	0.0091
Run 32	56.1121	0.9003	0.2695	0.2695
Run 33	42.7874	1.2461	0.8231	0.8231
Run 34	81.0848	1.6569	1.6569	1.6569
Run 35	85.6994	0.2807	0.2807	0.2807
Run 36	89.7283	0.2671	0.0673	0.0673
Run 37	126.4961	0.2552	0.0281	0.0281
Run 38	118.7836	0.2792	0.0250	0.0250
Run 39	124.6917	3.0839	0.7485	0.7485
Run 40	53.4261	2.8676	0.0327	0.0327
Run 41	130.6978	1.8341	0.4262	0.4262
Run 42	54.4280	0.8032	0.0066	0.0066
Run 43	67.8350	4.3944	0.2961	0.2961
Run 44	55.4601	1.7051	0.0158	0.0158
Run 45	78.6824	1.4359	0.4501	0.4501
Run 46	41.7005	0.3728	0.3728	0.3728
Run 47	67.8942	2.6070	0.0008	0.0008
Run 48	59.1401	0.6942	0.0974	0.0974
Run 49	74.7512	0.4849	0.4849	0.4849
Run 50	49.4526	3.4028	3.4028	3.4028
Run 51	37.1077	3.0819	1.0195	1.0195
Run 52	56.2564	0.1962	0.1009	0.1009
Run 53	51.9089	1.6619	0.0674	0.0674
Run 54	43.3197	0.3942	0.3108	0.3108
Run 55	90.4911	0.7590	0.7590	0.7590
Run 56	133.6162	1.8548	0.0409	0.0409
Run 57	86.7344	0.7064	0.0366	0.0366
Run 58	92.3951	0.6679	0.6679	0.6679
Run 59	116.3874	0.1284	0.1284	0.1284
Run 60	94.0807	0.7939	0.4557	0.4557
Run 61	75.0955	0.2911	0.1641	0.1641
Run 62	125.6201	0.8096	0.0748	0.0748
Run 63	129.0190	0.8857	0.0173	0.0173
Run 64	137.1274	1.5581	0.2324	0.2324
Average	65.0638	1.8208	0.9735	0.9723

جدول ۴-۸- نتایج مدل سازی مرتبه دوم برای دو نوع مدل منفرد و گسسته

مرتبه دوم گسسته						مرتبه دوم منفرد			Run
SS	R [∞]	Z2	k2	Z1	k1	SS	R [∞]	k	
2.19	83.97	0.00000	0.01800	1.00000	0.01800	2.19	83.97	0.018	Run 1
5.16	80.67	0.12600	0.01602	0.87400	0.01602	5.16	80.67	0.016	Run 2
19.98	82.35	1.00000	0.00900	0.00000	38.40000	19.98	82.35	0.009	Run 4
0.70	82.62	0.99996	0.00906	0.00004	0.01804	0.70	82.62	0.009	Run 32
11.84	83.45	0.50000	0.01288	0.50000	0.01288	11.84	83.45	0.013	Run 64

جدول ۴-۹- نتایج ثابت و مرتبه سینتیک فلوتاسیون در طول زمان کف گیری (Run: ۲۰)

n	k	t
1.53	0.67	0.5
1.57	0.61	1
1.63	0.53	2
1.71	0.43	4
1.83	0.35	8
1.97	0.34	12
2.50	0.34	16



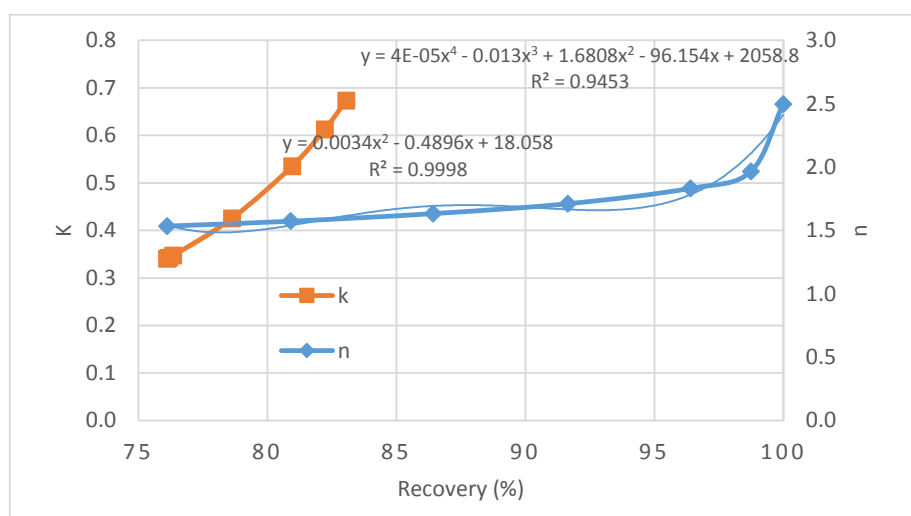
شکل ۴-۴- نمودار مرتبه فلوتاسیون و ثابت سینتیک

$$n = 0.006 t^3 - 0.0128 t^2 + 0.1016 t + 1.4809 \quad (۵-۴)$$

$$k = -0.003 t^3 + 0.0098 t^2 - 0.107 t + 0.7158 \quad (۹-۴)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، در طول زمان کف‌گیری ثابت سینتیک از حدود ۰/۷ به ۰/۳ کاهش می‌یابد و مرتبه فلوتاسیون از حدود ۱/۵ در شروع آزمایش تا بیش از ۲/۰ در انتهای کف‌گیری افزایش می‌یابد.

در شکل (۴-۵) نمودار مرتبه و ثابت سینتیک فلوتاسیون بر حسب بازیابی ارائه شده است. برای رسم این نمودار ابتدا بازیابی بینهایت ۱۰۰ فرض شده است و در مرحله اول مرتبه فلوتاسیون ثابت در نظر گرفته شده و با تغییر در مقدار ثابت سینتیک، تغییرات بازیابی لحاظ شده و نمودار رسم شده است. در مرحله بعد ثابت سینتیک ثابت فرض شده و با تغییر در مرتبه فلوتاسیون تغییرات بازیابی رسم شده است. همانطور که ملاحظه می شود با تغییرات مرتبه فلوتاسیون بازیابی تغییرات بیشتری پیدا می کند و می توان گفت بازیابی به مرتبه فلوتاسیون حساس تر است.



شکل ۴-۵- نمودار رابطه بین بازیابی با مرتبه فلوتاسیون و ثابت سینتیک

$$n = 4 \times 10^{-5} R^4 - 0.013 R^3 + 1.6808 R^2 - 96.154 R + 2058.8 \quad (۴-۷)$$

$$k = 0.0034 R^2 - 0.4896 R + 18.058 \quad (۴-۸)$$

$$R = \sqrt{\frac{k-d}{a}} - \frac{b}{2a} \quad (۴-۹)$$

که در آن: a: 0.0034, b: 0.4896 و c: 18.058

و

$$d = c - \frac{b^2}{4a} \quad (۴-۱۰)$$

فصل پنجم

بحث و تحلیل نتایج

۵-۱- مقدمه

با توجه به آنچه در فصل‌های قبل به آنها اشاره شد، پس از انجام آزمایش‌های اولیه، پارامترها و شرایط بهینه انتخاب شدند و با استفاده از آنها و با کمک نرم‌افزار DX10 طراحی آزمایش‌های سینتیکی و به دنبال آن آزمایش‌های مد نظر انجام شدند. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و با کمک نرم‌افزارهای Excel و SigmaPlot 12 مدل بهینه انتخاب شد و در نهایت پارامترهای مدل سینتیکی به عنوان پاسخ در نرم‌افزار DX10 جای‌گذاری شدند. در این فصل تأثیر پارامترهای مؤثر فلوتاسیون و برهم کنش آنها بر پارامترهای مدل سینتیکی بررسی می‌شود سپس شرایط بهینه‌ی پارامترهای عملیاتی با هدف بهینه‌سازی بازیابی سرب تعیین شده است.

۵-۲- تجزیه و تحلیل نتایج فلوتاسیون و آنالیز واریانس

در ابتدا برای شروع تجزیه و تحلیل سطوح مختلف پارامترهای عملیاتی در جدول (۵-۱) ارائه شده است.

جدول ۵-۱- سطوح مختلف پارامترهای عملیاتی

فاکتور	پارامتر	نوع	محوری پایین	حقیقی پایین	مرکزی	حقیقی بالا	محوری بالا
			سطح ۱/۶۸-	سطح ۱-	سطح ۰	سطح ۱+	سطح ۱/۶۸+
A	pH	Numeric	6.9	7.5	8.25	9.0	9.6
B	ابعاد ذرات	Numeric	44.0	53.0	64.0	75.0	84.0
C	درصد جامد	Numeric	23.0	25.0	27.5	30.0	32.1
D	مقدار سولفور سدیم	Numeric	2769.5	4000.0	5500.0	7000.0	8230.5
E	مقدار کلکتور	Numeric	1089.8	1500	2000	2500	2910.2
F	نوع کلکتور	Categoric	-	PAX	507	-	-

با استفاده از نتایج تجربی و تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA)، مدلی تجربی برای بازیابی فلوتاسیون بر حسب پارامترهای ورودی به نرم افزار تعیین شد. نتایج آزمایش‌ها در جدول (۴-۴) بیشتر ارائه شده است.

آنالیز واریانس، ابزاری آماری است که برای بررسی مؤثر و معنادار بودن مدل مورد نیاز است. در واقع این آنالیز در تجزیه و تحلیل اثر عاملی با بیش از دو سطح بر متغیر پاسخ مؤثر است و به همین دلیل در طراحی آزمایش کاربرد دارد. از این ابزار می‌توان برای غربال نمودن فاکتورهای با اهمیت یا معنادار بودنشان روی سیستم پاسخ مورد نظر استفاده کرد (Lazic 2004) و (دارابی ۱۳۹۱). معنادار بودن یک مدل به دو مقدار P و F وابسته است. مقدار بالای F و مقدار پایین P ($p < 0.05$) در سطح اطمینان ۹۵ درصد بیانگر معتبر بودن مدل به دست آمده است (دارابی، ۱۳۹۱). باید توجه داشت که همه‌ی پارامترها بر نرخ فلوتاسیون تأثیر مشهودی ندارند، اگر P value کمتر از ۰/۰۵ باشد تأثیر آن پارامتر بر پاسخ معنادار خواهد بود (Zhang et al. 2010). برای بررسی تأثیر پارامترهای فلوتاسیون بر پاسخ‌ها نیاز است تا برای هر پاسخ یک مدل تعیین شود که اجزای آن را پارامترهای مؤثر فلوتاسیون تشکیل می‌دهند. برای این منظور مدل‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت که در این میان مدل چند جمله‌ای کوارتیک (درجه دوم) کاهش یافته^۱ نسبت به سایر مدل‌ها مقدار F بالاتر و P پایین‌تر داشته و به همین دلیل به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. در ادامه مقادیر P برای تمام پاسخ‌ها و مدل به همراه اندرکنش‌های مؤثر در جدول (۵-۲) ارائه شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود:

- $k1$ با بیشترین و $k3$ و $Z2$ با کمترین فاکتورهای مؤثر بر آنها از سایر پاسخ‌ها متمایز هستند.
- پارامتر pH بیشترین تأثیر را بر $k1$ ، $k2$ و $Z3$ دارد.
- ابعاد ذرات بیشترین تأثیر را بر $k1$ ، $Z2$ و $Z3$ دارد.
- مقدار سولفور سدیم بیشترین تأثیر را بر R_{∞} دارد.
- تأثیر پارامترهای درصد جامد، مقدار و نوع کلکتور در مقادیر مورد مطالعه به صورت مستقیم بر پاسخ‌ها معنادار نیستند. اما تأثیر آنها در اندرکنش با سایر پارامترها بر تمامی پاسخ‌ها معنادار می‌باشد.
- تمامی پاسخ‌ها به صورت اندرکنش از تمامی پارامترهای عملیاتی تأثیرپذیرند. که در ادامه بیشتر شرح داده خواهد شد.

^۱ Polynomial Reduced Quartic

جدول ۵-۲- آنالیز سطح پاسخ^۱ مربوط به متغیرها و اندرکنش‌ها (خروجی نرم افزار طراحی آزمایش)

منبع	K1	K2	K3	Z1	Z2	Z3	R _∞
مدل	< 0.0001	0.0441	0.0421	0.0383	0.0493	0.0126	0.0398
A	0.0293	0.0321	0.1376	0.1088	0.2254	0.0043	0.8626
B	< 0.0001	0.1431	0.6773	0.6324	0.0071	0.0029	0.6963
C	0.7339	0.8061	0.3124	0.5289	0.6580	0.6850	0.9783
D	0.9722	0.0632	0.1091	0.7678	0.2848	0.2931	0.0073
E	0.0583	0.1326	0.9404	0.3842	0.1604	0.4566	0.5921
F	0.3559	0.4556	0.1699	0.4228	0.2351	0.4622	0.5734
AB	< 0.0001	0.0435	-	-	-	-	-
AC	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
AD	0.0006	-	-	-	-	-	-
AE	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
AF	0.0050	-	-	-	0.0052	0.0054	0.0328
BC	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
BD	0.0004	-	-	-	-	-	-
BE	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
BF	0.0026	0.0187	-	-	-	0.0199	-
CD	0.0004	-	-	-	-	-	-
CE	0.0003	-	-	-	-	-	-
CF	0.0011	0.0063	-	0.021	0.0433	-	-
DE	0.0467	-	-	-	-	-	-
DF	-	-	0.0088	-	-	-	0.0187
EF	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
A ²	0.0004	0.0351	-	0.0006	-	0.0009	0.0330
B ²	< 0.0001	0.1107	-	0.0032	-	0.0339	-
C ²	0.0038	-	-	-	-	-	-
E ²	< 0.0001	-	-	0.0050	0.0101	-	-
ABF	< 0.0001	-	0.0150	0.0215	0.0013	-	-
ACF	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
ADF	0.0027	-	0.0255	-	-	-	-
AEF	0.0001	-	-	-	-	-	-
BCF	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
BDF	0.0100	-	-	-	-	-	-
BEF	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
CDF	0.0003	-	-	-	-	-	-
CEF	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
DEF	-	0.0365	0.0023	-	-	-	0.0127
A ² B	< 0.0001	-	-	-	-	-	-
A ² D	< 0.0001	0.0306	0.0238	-	-	-	0.0018
A ² E	0.0005	-	-	-	-	-	-
A ² F	0.0039	-	-	0.0361	-	0.0087	-
AB ²	-	0.0902	-	-	-	0.0125	-
B ² F	-	-	0.0231	-	-	-	-
A ² B ²	< 0.0001	0.0422	-	0.0006	-	0.0191	0.0456
A ² BF	0.0007	0.0047	-	-	-	0.0016	-

1 Response surface

A ² CF	0.0057	-	-	-	-	-	-
منبع	K1	K2	K3	Z1	Z2	Z3	R _∞
A ² EF	< 0.0001	0.0436	-	-	-	-	-
AB ² F	0.0450	-	-	-	0.0303	0.0045	0.0363
عدم تطابق	0.49	0.07	0.23	0.16	0.19	0.23	0.09
ضریب همبستگی	0.9935	0.8779	0.8543	0.8050	0.8105	0.8589	0.7903
دقت کافی	41.099	6.247	6.950	6.161	5.324	9.268	6.782

اطمینان از اعتبار و دقت مدل بخش مهمی از تجزیه و تحلیل داده‌ها را شامل می‌شود. دقت کافی^۱ یکی دیگر از پارامترهای خروجی از نرم‌افزار است که دقت مدل را نشان می‌دهد این ضریب باید از عدد ۴ بالاتر باشد تا دقت مدل تأیید شود (Zhang, et al, 2010) و (Korbahti, et al, 2009).

دقت کافی برای مدل‌های تعیین شده، نشان از دقت مناسب مدل‌ها دارد. همچنین، در این جدول سایر پارامترهای مدل نظیر ضریب همبستگی، عدم تطابق^۲ و ... نیز برای مدل‌های هر پاسخ ارائه شده است.

در نهایت، با استفاده از مقادیر P و F مدل نهایی تأیید شده برای محاسبه‌ی پارامترهای مدل سینتیکی (پاسخ‌ها) بر اساس مقادیر کدگذاری شده‌ی پارامترها و اندرکنش‌های آنها مطابق با معادله‌های (۵-۱) تا (۵-۷) و همچنین مدل‌های واقعی در معادلات (۵-۸) تا (۵-۲۱) ارائه شده است.

(۵-۱)

$$K_1 = +1.56 + 0.87A - 5.63B - 1.61AB - 2.20AC - 0.98AD - 2.69AE - 1.17AF + 3.47BC + 1.02BD + 1.46BE + 1.28BF + 1.03CD + 1.05CE - 1.43CF + 0.50DE - 4.78EF + 0.98A^2 + 3.73B^2 + 0.75C^2 + 2.90E^2 + 3.85ABF + 3.33ACF + 0.82ADF + 1.18AEF - 1.51BCF - 0.68BDF - 2.38BEF - 1.08CDF - 2.91CEF + 5.20A^2B - 2.95A^2D - 1.85A^2E - 0.67A^2F - 3.70A^2B^2 - 1.80A^2BF + 1.37A^2CF + 5.43A^2EF + 0.94AB^2F$$

(۵-۲)

$$(K_2)^2 = +0.67 + 0.26 A - 0.16 AB - 0.29 BF - 0.19 CF + 0.16 A^2 + 0.12 B^2 + 0.16 DEF - 0.32 A^2D - 0.24 AB^2 - 0.37 A^2B^2 + 0.44 A^2BF - 0.29 A^2EF$$

(۵-۳)

$$K_3 = +0.11 + 0.020DF + 0.022ABF + 0.020ADF + 0.029DEF - 0.037A^2D - 0.017B^2F$$

(۵-۴)

$$(Z_1)^{0.36} = +3.56 + 0.42CF - 0.42A^2 - 0.35B^2 - 0.33E^2 - 0.27ABF + 0.21A^2F + 0.87A^2B^2$$

¹ Adeq Precision

² Lack of fit

(Δ-Δ)

$$(Z_2)^{1.25} = +94.62 - 34.18 B - 35.77 AF - 24.62 CF + 20.55 E^2 + 27.42 ABF + 31.64 AB^2F$$

(ℰ-Δ)

$$Z_3 = +25.58 - 8.95A + 9.42B + 8.67AF + 7.02BF + 6.84A^2 + 4.00B^2 - 4.44A^2F + 9.05AB^2 - 10.51A^2B^2 - 12.05A^2BF - 10.56AB^2F$$

(Υ-Δ)

$$(R_{\infty})^{-3} = +1.948 \times 10^{-6} + 1.453 \times 10^{-7} D - 1.121 \times 10^{-7} AF + 1.249 \times 10^{-7} DF - 6.733 \times 10^{-8} A^2 + 8.590 \times 10^{-8} DEF - 2.071 \times 10^{-7} A^2 D - 1.200 \times 10^{-7} A^2 B^2 + 1.304 \times 10^{-7} AB^2 F$$

PAX:

(Λ-Δ)

$$K_1 = -12171.92130 + 3119.21241 \text{ pH} + 522.61868 \text{ d80} - 131.54165 \text{ pH} * \text{d80} + 18.95087 \text{ pH} * \text{Solid content} + 0.056043 \text{ pH} * \text{Na2S} + 0.416890 \text{ pH} * \text{Collector doas} + 0.180929 \text{ d80} * \text{Solid content} + 0.000103 \text{ d80} * \text{Na2S} + 0.000698 \text{ d80} * \text{Collector doas} + 0.000564 \text{ Solid content} * \text{Na2S} + 0.003173 \text{ Solid content} * \text{Collector doas} + 6.70671E-07 \text{ Na2S} * \text{Collector doas} - 184.36883 \text{ pH}^2 + 0.119886 \text{ Solid content}^2 + 0.000012 \text{ Collector doas}^2 + 8.08092 \text{ pH}^2 * \text{d80} - 0.003494 \text{ pH}^2 * \text{Na2S} - 0.025892 \text{ pH}^2 * \text{Collector doas} - 0.054291 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

(ϑ-Δ)

$$(K_2)^2 = -933.56071 + 234.42680 \text{ pH} - 9.56777 \text{ pH} * \text{d80} - 14.70274 \text{ pH}^2 - 0.343990 \text{ d80}^2 + 0.598852 \text{ pH}^2 * \text{d80} - 0.000375 \text{ pH}^2 * \text{Na2S} + 0.001301 \text{ pH}^2 * \text{Collector doas} + 0.086453 \text{ pH} * \text{d80}^2 - 0.005400 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

(\ • -Δ)

$$K_3 = +35.61863 - 0.002915 \text{ Na2S} + 0.112484 \text{ pH} * \text{d80} + 0.000698 \text{ pH} * \text{Na2S} - 2.57315E-08 \text{ Na2S} * \text{Collector doas} + 0.003219 \text{ d80}^2 - 0.000044 \text{ pH}^2 * \text{Na2S}$$

(\ \ -Δ)

$$(Z_1)^{0.36} = +24.92391 \text{ Solid content} + 28.52565 \text{ pH} * \text{d80} + 45.43858 \text{ pH}^2 + 0.892399 \text{ d80}^2 - 6.71130E-07 \text{ Collector doas}^2 + 0.012850 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

(\ Ψ -Δ)

$$(Z_2)^{1.25} = -32584.47297 + 9889.38547 \text{ pH} + 2188.55282 \text{ d80} - 1139.21677 \text{ Solid content} - 601.32587 \text{ pH} * \text{d80} + 0.000042 \text{ Collector doas}^2 + 4.57886 \text{ pH} * \text{d80}^2$$

(\ Ξ -Δ)

$$(Z_3) = -54365.55708 + 12516.13240 \text{ pH} + 1620.69914 \text{ d80} - 710.25103 \text{ pH}^2 - 12.27665 \text{ d80}^2 + 20.61635 \text{ pH}^2 * \text{d80} + 0.012130 \text{ pH}^2 * \text{Collector doas} + 2.76503 \text{ pH} * \text{d80}^2 - 0.154480 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

(۱۴-Δ)

$$(R_{\infty})^{-3} = -0.000310 + 0.000086 \text{ pH} - 8.03383\text{E-}09 \text{ Na2S} - 1.25924\text{E-}13 \text{ Na2S} * \text{Collector doas} - 5.75870\text{E-}06 \text{ pH}^2 - 1.26351\text{E-}10 \text{ pH}^2 * \text{Na2S} + 2.69760\text{E-}08 \text{ pH} * \text{d80}^2 - 1.76364\text{E-}09 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

Danafloat 507:

(۱۵-Δ)

$$K_1 = -18604.78676 + 4607.11180 \text{ pH} + 504.76389 \text{ d80} - 123.65961 \text{ pH} * \text{d80} - 9.64281 \text{ pH} * \text{Solid content} + 0.057505 \text{ pH} * \text{Na2S} - 0.214459 \text{ pH} * \text{Collector doas} + 0.071304 \text{ d80} * \text{Solid content} + 0.000021 \text{ d80} * \text{Na2S} - 0.000168 \text{ d80} * \text{Collector doas} - 0.000012 \text{ Solid content} * \text{Na2S} - 0.001489 \text{ Solid content} * \text{Collector doas} + 6.70671\text{E-}07 \text{ Na2S} * \text{Collector doas} - 280.39662 \text{ pH}^2 - 3.68505 \text{ d80}^2 + 0.119886 \text{ Solid content}^2 + 0.000012 \text{ Collector doas}^2 + 7.49949 \text{ pH}^2 * \text{d80} - 0.003494 \text{ pH}^2 * \text{Na2S} + 0.012753 \text{ pH}^2 * \text{Collector doas} - 0.054291 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

(۱۶-Δ)

$$(K_2)^2 = -1221.40359 + 306.24261 \text{ pH} - 11.89597 \text{ pH} * \text{d80} - 19.17617 \text{ pH}^2 - 0.345478 \text{ d80}^2 + 0.740646 \text{ pH}^2 * \text{d80} - 0.000375 \text{ pH}^2 * \text{Na2S} - 0.000773 \text{ pH}^2 * \text{Collector doas} + 0.086453 \text{ pH} * \text{d80}^2 - 0.005400 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

(۱۷-Δ)

$$K_3 = +7.54541 - 0.003260 \text{ Na2S} - 0.076032 \text{ pH} * \text{d80} + 0.000733 \text{ pH} * \text{Na2S} + 5.18047\text{E-}08 \text{ Na2S} * \text{Collector doas} - 0.000984 \text{ d80}^2 - 0.000044 \text{ pH}^2 * \text{Na2S}$$

(۱۸-Δ)

$$(Z_1)^{0.36} = +3434.03915 - 9.76461 \text{ Solid content} + 26.88069 \text{ pH} * \text{d80} + 50.34365 \text{ pH}^2 + 0.892399 \text{ d80}^2 - 1.93544\text{E-}06 \text{ Collector doas}^2 + 0.012850 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

(۱۹-Δ)

$$(Z_2)^{1.25} = -1.24995\text{E+}05 + 30323.36414 \text{ pH} + 3385.28687 \text{ d80} + 351.60712 \text{ Solid content} - 809.65294 \text{ pH} * \text{d80} + 0.000122 \text{ Collector doas}^2 + 5.27611 \text{ pH} * \text{d80}^2$$

(۲۰-Δ)

$$(Z_3) = -25056.71518 + 6311.68761 \text{ pH} + 1115.23155 \text{ d80} - 385.92045 \text{ pH}^2 - 10.33140 \text{ d80}^2 + 16.72148 \text{ pH}^2 * \text{d80} - 0.007906 \text{ pH}^2 * \text{Collector doas} + 2.53228 \text{ pH} * \text{d80}^2 - 0.154480 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

(۲۱-Δ)

$$(R_{\infty})^{-3} = -0.000309 + 0.000074 \text{ pH} - 2.47865\text{E-}08 \text{ Na2S} + 1.03154\text{E-}13 \text{ Na2S} * \text{Collector doas} - 4.39020\text{E-}06 \text{ pH}^2 - 3.64531\text{E-}10 \text{ pH}^2 * \text{Na2S} + 2.98502\text{E-}08 \text{ pH} * \text{d80}^2 - 1.76364\text{E-}09 \text{ pH}^2 * \text{d80}^2$$

همانطور که مشاهده می‌شود پارامترهایی را که بیشترین تأثیر را بر پاسخ‌ها دارند از ضریب بالاتری برخوردارند. حال با در دست داشتن معادلات فوق و معادله (۴-۲) می‌توان مقدار بازیابی را برای تمامی شرایط آزمایشگاهی تعیین کرد.

۵-۳- تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای فلوتاسیون بر پاسخ‌ها

همانطور که پیشتر اشاره شد، اثرات پارامترهای آزمایشگاهی بر پاسخ‌ها به دو صورت فردی و اندرکنش می‌باشد. در ادامه این اثرات برای هر ۷ پاسخ جداگانه ارائه شده است. لازم به ذکر است که در نمودارها تنها پارامترهای مؤثر منفرد و اندرکنش‌های دوگانه می‌تواند ارائه شود.

پیش از بررسی تأثیرات پارامترهای عملیاتی بر مدل، توضیحات تکمیلی در خصوص برخی از پارامترهای عملیاتی ارائه شده که در ادامه ارائه شده است.

سولفور سدیم در سطح سروزیت مشابه فرمول (۵-۲۲) جذب می‌شود و مواد تجزیه شده بر اساس pH حل می‌شوند. برای مثال در pH کمتر از ۷، H_2S گونه غالب S خواهد بود و HS^- در pH ۷ تا ۱۳/۹ و S^{2-} در pH بزرگتر از ۱۳/۹ (Sun et al., 2012, Feng et al., 2016, Herrera-Urbina et al., 1999) بیشترین بازیابی سروزیت در pH قلیایی متوسط رخ می‌دهد (Feng et al., 2015, Feng et al., 2017). بنابراین واکنش HS^- با سروزیت قابل ملاحظه است.



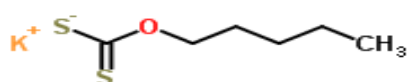
با توجه به اینکه یون S در فرم HS^- به خوبی بر سطح سروزیت نشسته و آن را فعال می‌کند هرچه pH بیشتر شود S^{2-} و هرچه کمتر شود H_2S گونه غالب S است. به همین دلیل در pH قلیایی متوسط بیشترین مقدار HS^- وجود دارد. در این تحقیق نیز با افزایش pH تا ۹/۵ k_1 افزایش می‌یابد که به دلیل مقدار حداکثر S در فرم HS^- در این pH باشد.

در خصوص تأثیر ابعاد بر k_1 نیز می‌توان گفت با کاهش ابعاد -تا حدی که نرمه زیادی تولید نشود- به دلیل آزاد شدن بیشتر کانی‌ها سینتیک افزایش خواهد یافت.

در ادامه برای بررسی بیشتر تأثیر نوع کلکتور بر پارامترهای مدل ابتدا بررسی ساختار کلکتورهای مورد استفاده در این تحقیق پرداخته خواهد شد و سپس تأثیر آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

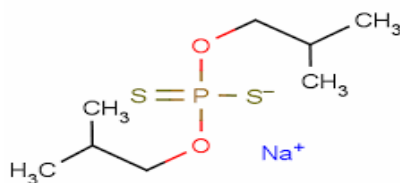
PAX: آمیل گزانتات پتاسیم:

$C_5H_{11}OCS_2HK$ (Potassium Amyl Xanthate)

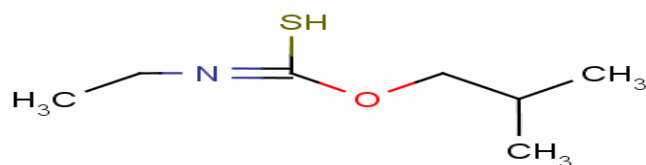


507: ایزوبوتیل دی تیوفسفات سدیم + ایزوپروپیل اتیل تیونوکاربامات:

$C_8H_{18}NaO_2PS_2$ (Sodium Diisobutyl Dithiophosphate)



$(CH_3)_2CHOCSNHC_2H_5$ (Isopropyl Ethyl Thiocarbamate)



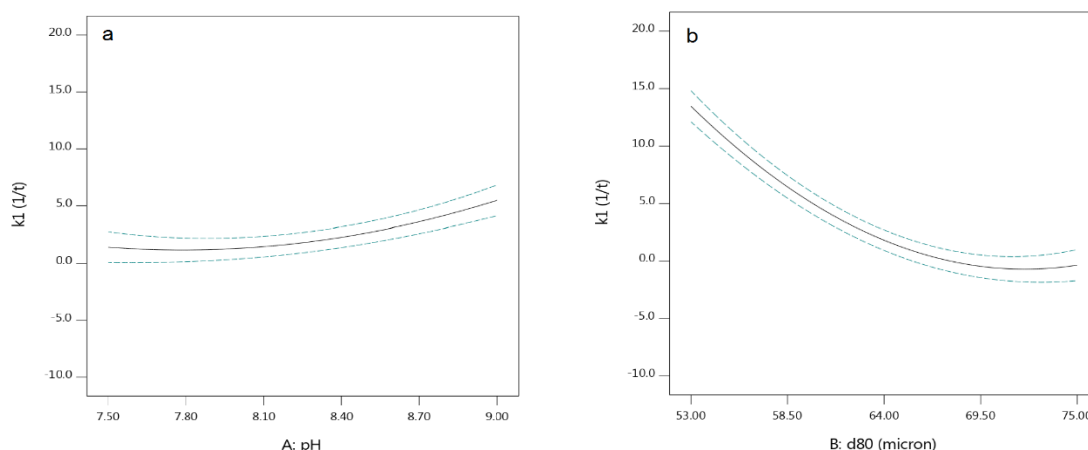
کلکتورها پس از حضور در آب هیدرولیز می‌شوند که این اتفاق لیستر در pH اسیدی و خنثی بیشتر رخ می‌دهد، یون S^- گزانتات‌ها، H موجود در آب را جذب کرده و تشکیل HS می‌دهد. این در حالیست که در زمانی که pH قلیایی باشد یون گوگرد راحتتر جذب کانی‌ها می‌شود. گزانتات‌ها پس از تجزیه ترکیباتی نظیر هیدروکسید پتاسیم، دی سولفید کربن و آمیل الکل را تشکیل می‌دهند.

دی تیوفسفات‌ها نیز به همین ترتیب در زمان حضور در آب مخصوصاً زمانی که pH اسیدی یا خنثی باشد به ترکیباتی نظیر اسید فسفریک، سولفید دی هیدروژن و ایزوبوتیل الکل تجزیه می‌شوند.

تیونوکربامات‌ها نیز در زمان حضور در آب با تشکیل ترکیباتی نظیر سولفور هیدروژن و آمین‌ها مخصوصاً در pH اسیدی یا خنثی تجزیه می‌شوند.

۵-۳-۱- تأثیر پارامترهای فلوتاسیون بر k_1

k_1 بیش از سایر پاسخ‌ها از پارامترهای فلوتاسیون تأثیرپذیر است. در شکل (۵-۱) اثر انفرادی دو پارامتر pH و ابعاد ذرات بر پاسخ k_1 ارائه شده است.

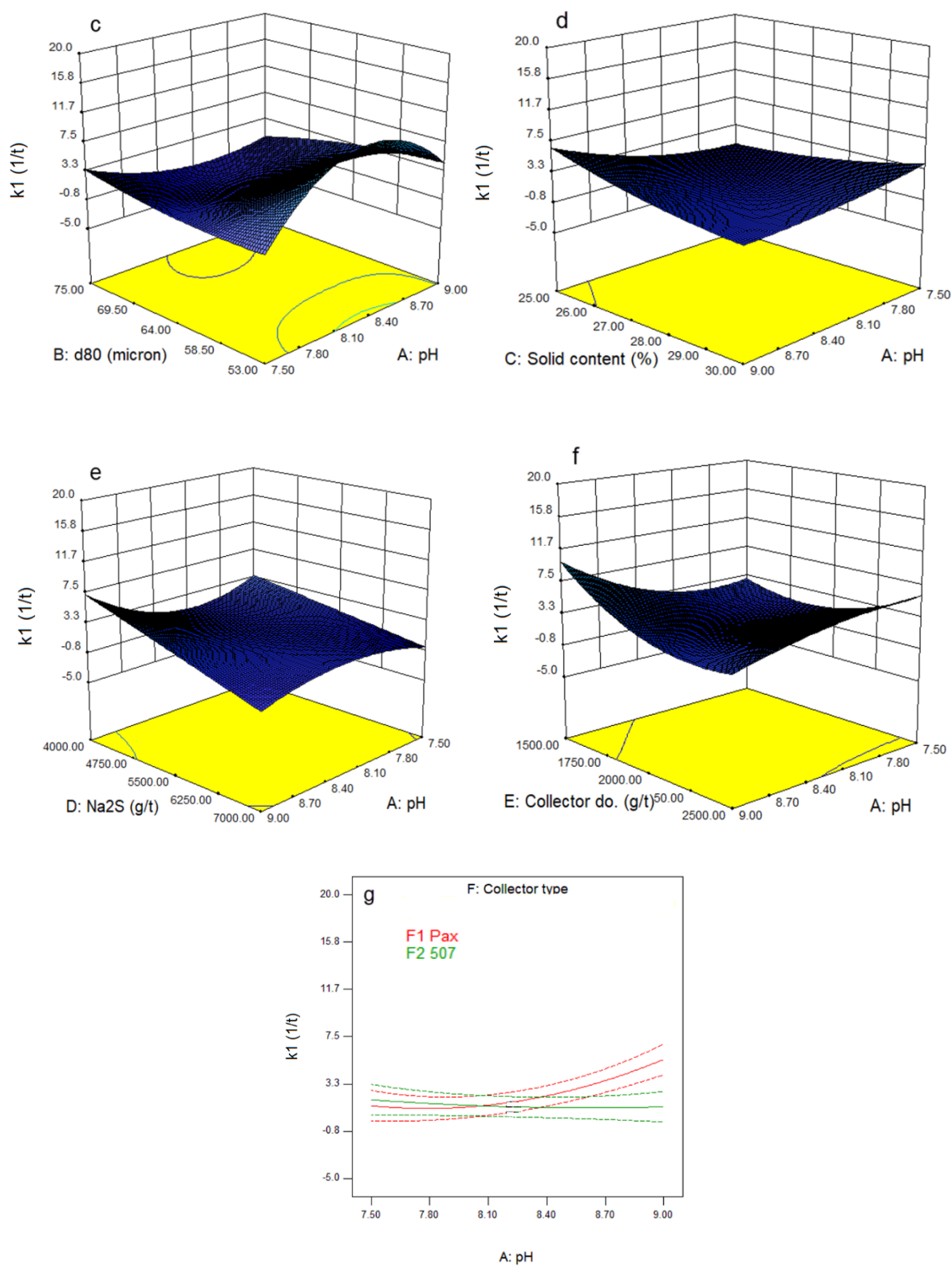


شکل ۵-۱- اثرات انفرادی دو پارامتر pH و ابعاد ذرات بر k_1 (a: pH و b: ابعاد ذرات) (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود

- با افزایش pH، k_1 افزایش و با افزایش ابعاد ذرات مقدار k_1 کاهش می‌یابد. همچنین همانطور که مشخص است ابعاد ذرات تأثیر بیشتری بر k_1 دارد. این موضوع در معادله (۵-۱) نیز بر اساس ضریب بیشتر آن مشخص است.

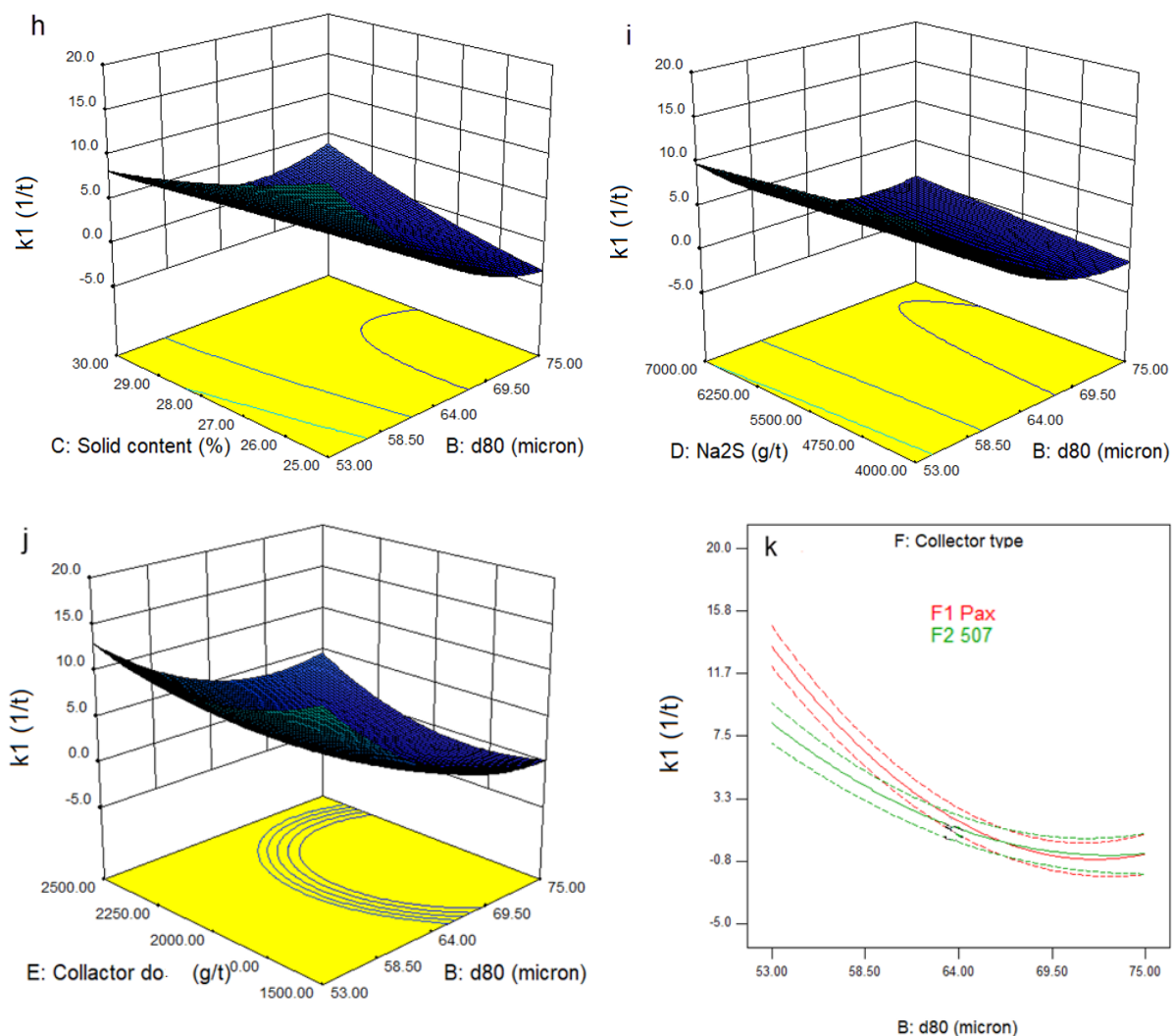
در شکل (۵-۲) اثر اندرکنش پارامتر pH با سایر پارامترها بر پاسخ k_1 ارائه شده است.



شکل ۵-۲- اثر اندرکنش پارامتر pH با سایر پارامترها (c: ابعاد ذرات، d: درصد جامد، e: مقدار سولفور سدیم، f: مقدار کلکتور و g: نوع کلکتور) بر k_1 (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

- در شکل c: در ابعاد درشت‌تر با افزایش pH، k_1 کاهش می‌یابد که نشان از تأثیر بیشتر ابعاد در این شرایط دارد. در ابعاد ریزتر با افزایش pH، k_1 ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که نشان از حضور حداکثری یون HS^- در آن pH دارد. از طرفی دیگر در pHهای پایین‌تر ابعاد تأثیر کمی بر k_1 دارد ولی با افزایش pH با کاهش ابعاد، k_1 افزایش می‌یابد که این موضوع با توجه به آنچه که در پیشتر گفته شد قابل انتظار بود.
 - در شکل d: در درصد جامد پایین، در افزایش pH، k_1 افزایش می‌یابد که این موضوع به دلیل حضور حداکثری یون HS^- در آن pH می‌باشد ولی در درصد جامد بالاتر pH تأثیر ناچیزی بر ثابت سینتیک دارد. از طرفی دیگر در pH پایین‌تر با کاهش درصد جامد، k_1 کاهش و در pH بالاتر با افزایش درصد جامد، k_1 کاهش می‌یابد که این موضوع به دلیل افزایش گرانیوی پالپ باشد.
 - در شکل e: در تمام بازه pH با افزایش مقدار سولفور سدیم k_1 کاهش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که با افزایش مقدار یون سولفور در پالپ این یون با کلکتور واکنش داده و جذب کلکتور را بر سطح ذرات کند کرده و سبب کاهش سینتیک فلوتاسیون خواهد شد.
 - در شکل f: بیشترین مقدار k_1 در pH بالا و مقدار کم کلکتور به دست می‌آید. با افزایش مقدار کلکتور و تشکیل میسل اثر بخشی کلکتور بر ذرات کم شده و سینتیک کاهش می‌یابد.
 - در شکل g: در زمان استفاده دانافلوت 507 تغییرات pH تأثیر زیادی بر k_1 ندارد ولی در زمان استفاده از PAX با افزایش pH، k_1 افزایش می‌یابد. pH همواره بر کارکرد کلکتورها تأثیر دارد نتایج نشان می‌دهد تأثیرپذیری کلکتور PAX بیشتر از دانافلوت 507 می‌باشد. همچنین دی تیوفسفاتها نسبت به گزانتاتها بیشتر هیدرولیز می‌شوند و گزانتاتها پایدارترند.
- در شکل (۳-۵) اثر اندرکنش پارامتر ابعاد ذرات با سایر پارامترها بر پاسخ k_1 ارائه شده است.

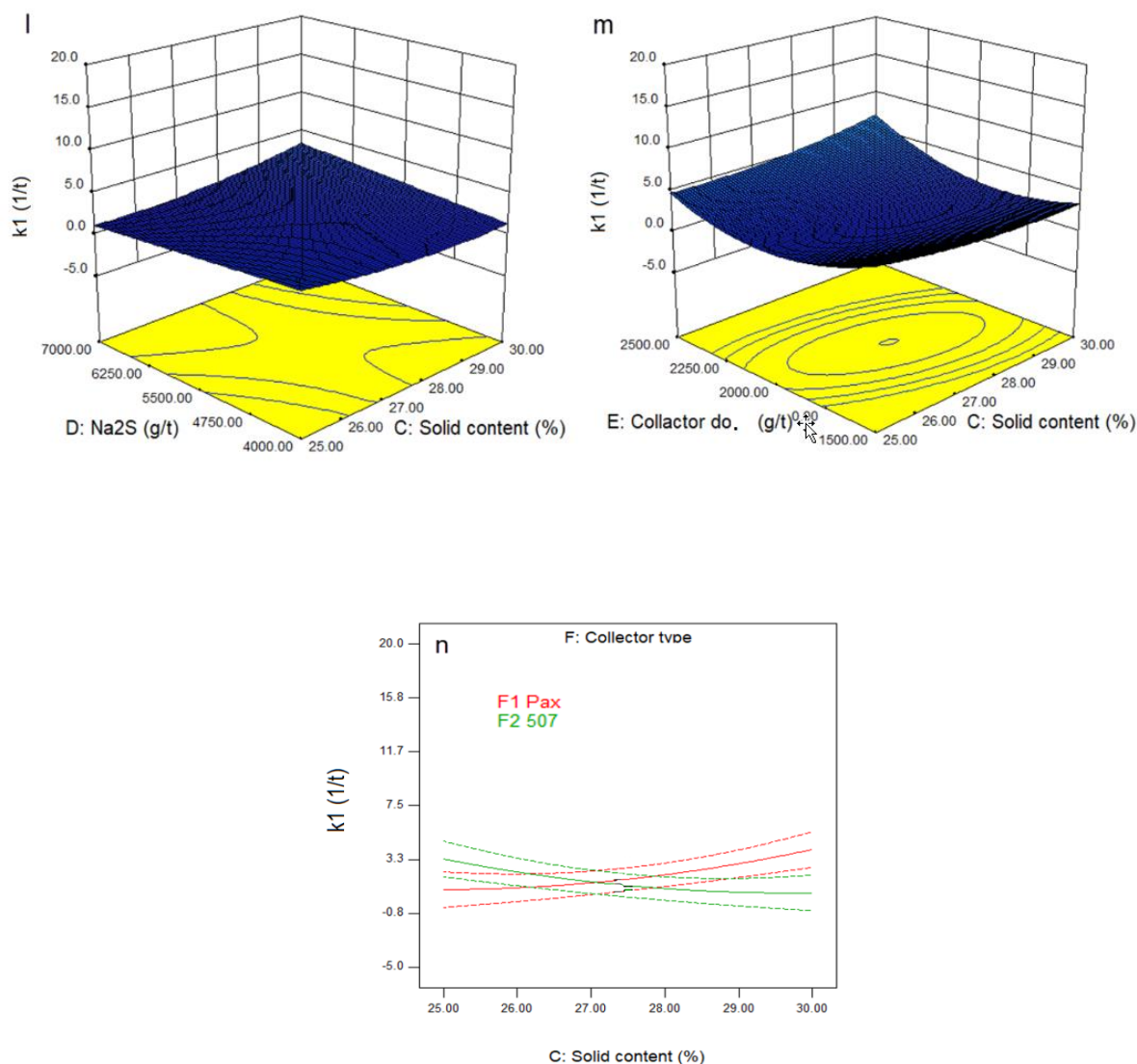


شکل ۵-۳- اثر اندرکنش پارامتر ابعاد ذرات با سایر پارامترها (h: درصد جامد، i: مقدار سولفور سدیم، j: مقدار کلکتور و k: نوع کلکتور) بر k_1 (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

- در شکل h تا k: تأثیر ابعاد بسیار بیشتر از سایر پارامترهاست. به طوریکه با کاهش ابعاد k_1 افزایش می‌یابد که این موضوع به دلیل افزایش درجه آزادی ذرات می‌باشد.

در شکل (۵-۴) اثر اندرکنش پارامتر درصد جامد با سایر پارامترها بر پاسخ k_1 ارائه شده است.

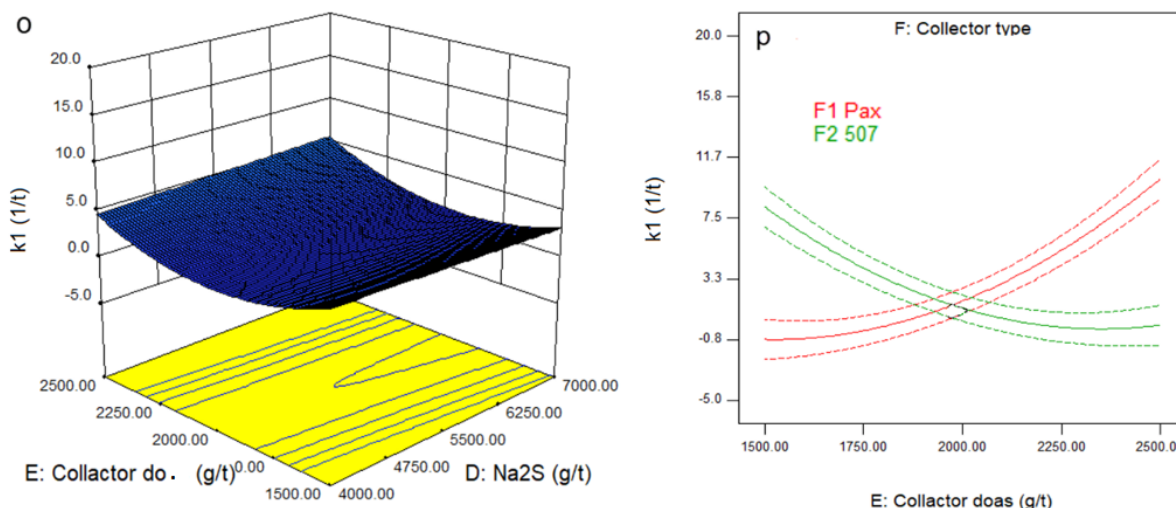


شکل ۴-۵- اثر اندرکنش پارامتر درصد جامد با سایر پارامترها (l: مقدار سولفور سدیم، m: مقدار کلکتور و n: نوع کلکتور) بر k_1 (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

- در شکل l تا n: اندرکنش در درصد جامد با نوع کلکتور، مقدار کلکتور و مقدار سولفور سدیم تأثیر ناچیزی بر k_1 دارند. در درصد جامد بالا با افزایش کلکتور کمی k_1 افزایش یافته که این موضوع به دلیل حضور بیشتر ذرات و نیاز بیشتر به کلکتور می‌باشد.

در شکل (۵-۵) اثر اندرکنش پارامتر مقدار کلکتور با سایر پارامترها بر پاسخ k_1 ارائه شده است.



شکل ۵-۵- اثر اندرکنش پارامتر مقدار کلکتور با سایر پارامترها (O: مقدار سولفور سدیم و P: نوع کلکتور) بر k_1 (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

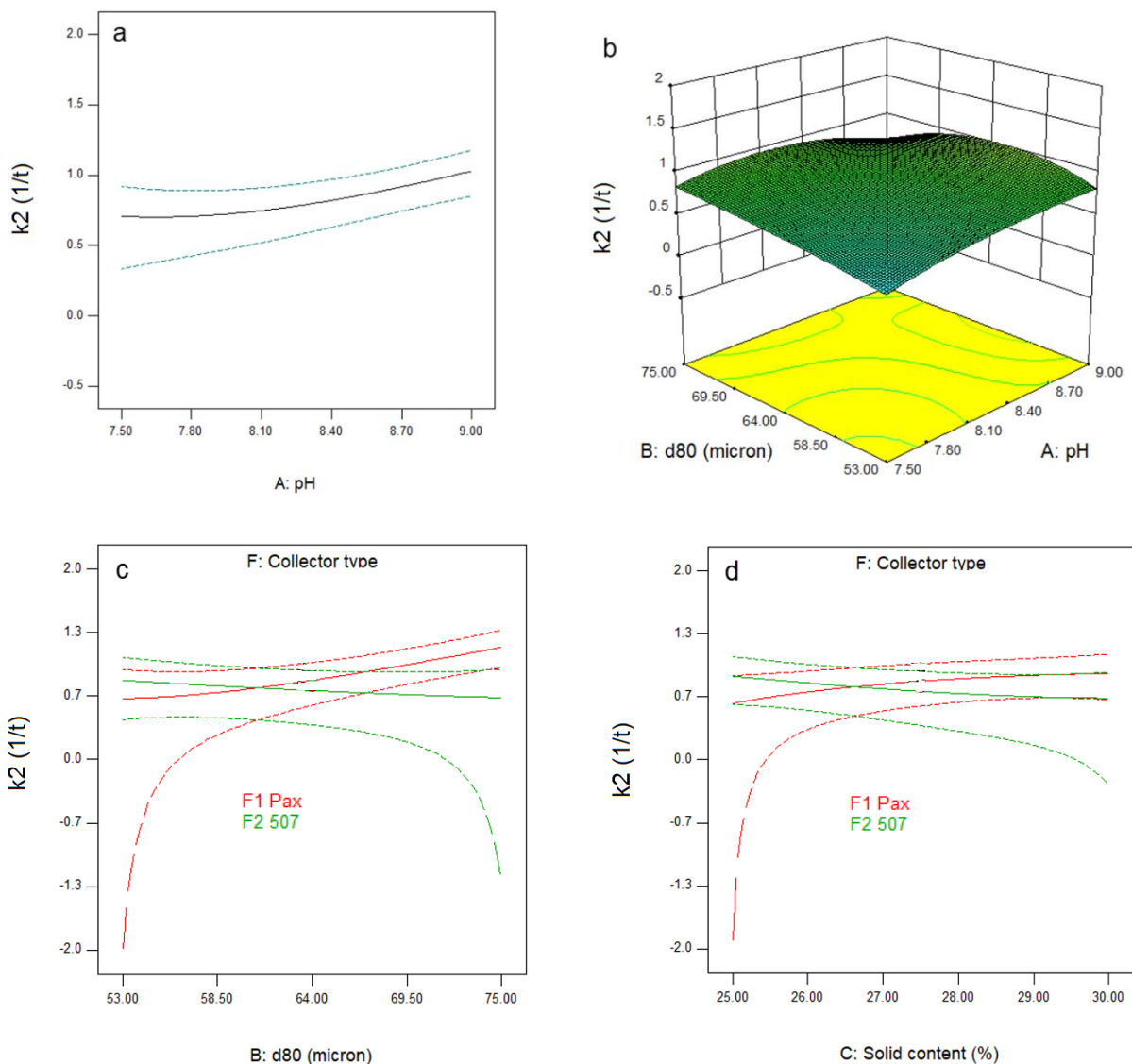
- در شکل O: در تمامی مقادیر کلکتور، افزایش سولفور سدیم تأثیری بر k_1 ندارد ولی از طرفی دیگر در تمام مقادیر سولفور سدیم، با کاهش مقدار کلکتور، k_1 کمی کاهش می‌یابد که این موضوع به دلیل تشکیل میسل در غلظت‌های بالای کلکتور می‌باشد.
- در شکل P: در حضور PAX با افزایش مقدار کلکتور، k_1 افزایش می‌یابد و در حضور دانافلوت 507 این قضیه برعکس است که به دلیل اختلاف آن در مقدار مورد نیاز کلکتور در تشکیل میسل می‌باشد.

در نهایت می‌توان گفت بیشترین مقدار k_1 در ابعاد ریز و pH بالا به دست می‌آید و سایر پارامترها تأثیر کمتری بر k_1 دارند.

۵-۳-۲- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر k_2

پارامتر k_2 تأثیرپذیری کمتری از پارامترهای مؤثر فلوتاسیون نسبت به k_1 دارد.

در شکل (۵-۶) اثر پارامترها و اندرکنش‌ها بر پاسخ k_2 ارائه شده است.



شکل ۵-۶- اثر پارامترها و اندرکنش‌ها بر پاسخ k_2 : a) pH، b) اندرکنش ابعاد ذرات و pH، c) اندرکنش ابعاد ذرات و نوع کلکتور و d) اندرکنش درصد جامد و نوع کلکتور (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

- در شکل a: با افزایش pH، k_2 افزایش می‌یابد. همانطور که پیشتر گفته شد، با افزایش pH به دلیل مقدار حداکثر S در فرم HS^- و افزایش سرعت جذب بر سطح کانی، k_2 نیز افزایش می‌یابد.

- در شکل b: در ابعاد ذرات کوچک، تغییرات pH تأثیر کمی بر k_2 دارد در pH بالا با افزایش ابعاد ذرات، سینتیک ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در ابعاد کوچک به دلیل حضور نرمه و در ابعاد بزرگتر به دلیل کاهش درجه آزادی سینتیک کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه با

کاهش ابعاد k_1 مرتباً افزایش داشته است ولی کاهش بیشتر از حد ذرات به دلیل حضور نرمه-ها تأثیر منفی بر k_2 دارد. لذا به نظر می‌رسد که k_2 تأثیرپذیری بیشتری از حضور نرمه‌ها نسبت به k_1 داشته باشد.

- در شکل c: در حضور PAX با افزایش ابعاد ذرات، k_2 کمی افزایش می‌یابد که این موضوع در زمان استفاده از دانافلوت 507 بر عکس است که این موضوع به دلیل ساختار شیمیایی کلکتورها می‌باشد.

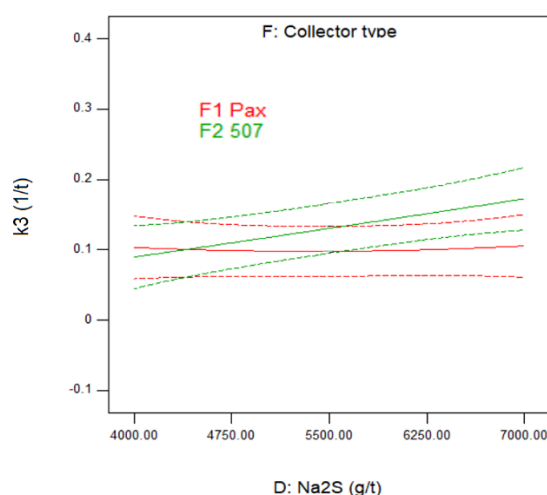
- در شکل d: در حضور PAX، درصد جامد، تأثیر چندانی بر k_2 ندارد ولی در حضور دانافلوت 507 با افزایش درصد جامد به دلیل افزایش ویسکوزیته پالپ، سینتیک کاهش می‌یابد.

- در نهایت اینکه مقدار بالای k_2 در مقادیر بالای pH، ابعاد ذرات متوسط و استفاده از PAX به دست می‌آید.

۳-۳-۵- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر k_3

پارامتر k_3 جزو پاسخ‌هایی است که کمترین تأثیرپذیری را از پارامترهای مؤثر فلوتاسیون دارد.

در شکل (۷-۵) اثرات اندرکنش مقدار سولفور سدیم و نوع کلکتور بر پاسخ k_3 ارائه شده است.



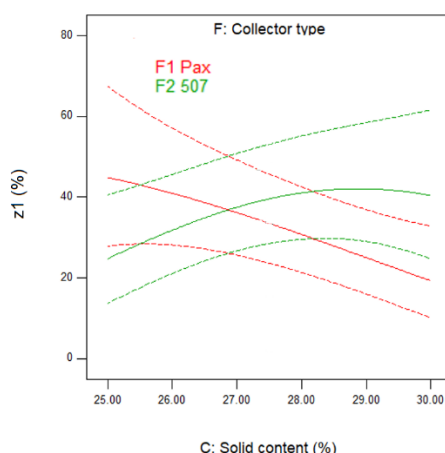
شکل ۷-۵- اثر اندرکنش مقدار سولفور سدیم و نوع کلکتور بر k_3
(سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

- بیشترین مقدار k_3 در مقدار بالای سولفور سدیم و استفاده از دانافلوت 507 می‌باشد. پیشتر نیز گفته شد که در زمان استفاده از دانافلوت 507 به دلیل حضور همزمان دو کلکتور جذب بر ذرات بهتر و سریعتر صورت می‌گیرد و افزایش مقدار سولفور سدیم نیز با افزایش سطوح سولفوره شده می‌تواند موجب افزایش k_3 شود. مقدار بالای یون سولفور در پالپ سبب واکنش آن با کلکتورها می‌شود و در اثر هم رسوبی توانایی کلکتور را کاهش می‌دهد که این اثر رقابتی در گزانتات‌ها بیشتر است چرا که در تیونوکربنات‌ها به دلیل عدم حضور کاتیون‌های سدیم یا پتاسیوم و عدم بار منفی سطحی (همانطور که فرمول شیمیایی آن مشخص است) با سولفور سدیم وارد واکنش نشده و فعالیت آن به قوت خود باقی می‌ماند.

۵-۳-۴- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر Z1

پارامتر Z1 نیز جزو پاسخ‌هایی است که کمترین تأثیرپذیری را نسبت به پارامترهای مؤثر فلوتاسیون دارد. در شکل (۵-۸) اثر اندرکنش مقدار درصد جامد و نوع کلکتور بر پاسخ Z1 ارائه شده است.



شکل ۵-۸- اثر اندرکنش درصد جامد و نوع کلکتور بر Z1 (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

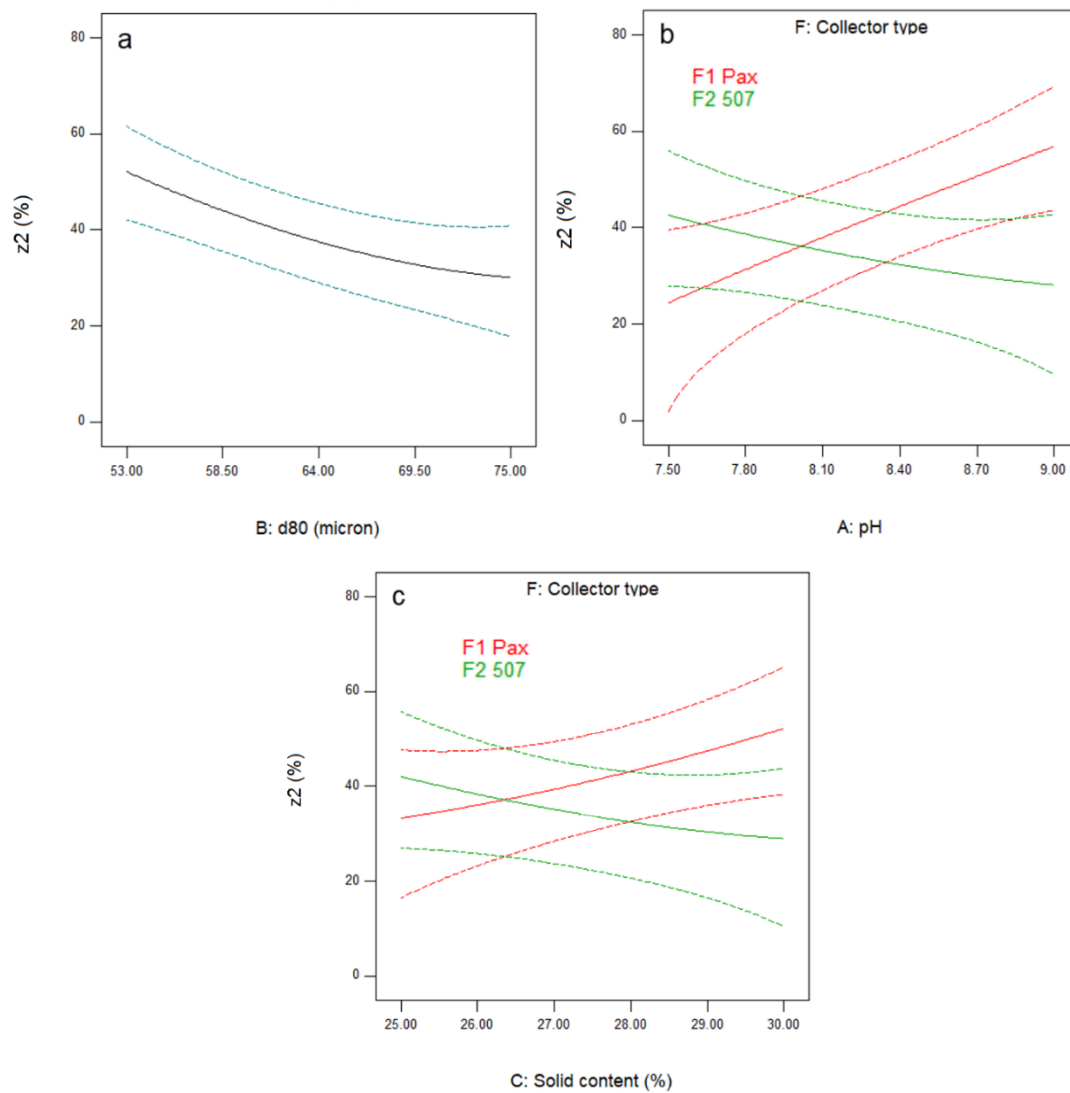
- در حضور دانافلوت 507 با افزایش درصد جامد Z1 افزایش می‌یابد ولی در حضور PAX این موضوع برعکس می‌باشد. به نظر می‌رسد در زمان استفاده از دانافلوت 507 با افزایش درصد جامد، درصد موادی که با نرخ k_1 شناور می‌شوند بیشتر خواهد شد که این موضوع به دلیل حضور هم زمان دو کلکتور و تأثیر بیشتر بر دامنه وسیعتری از ذرات نسبت به کلکتور PAX می‌باشد. همچنین ویسکوزیته تأثیر کمتری بر دانافلوت 507 دارد.

۵-۳-۵- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر Z2

در شکل (۵-۹) اثرات اصلی و اندرکنش پارامترهای مختلف بر پاسخ Z2 ارائه شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود:

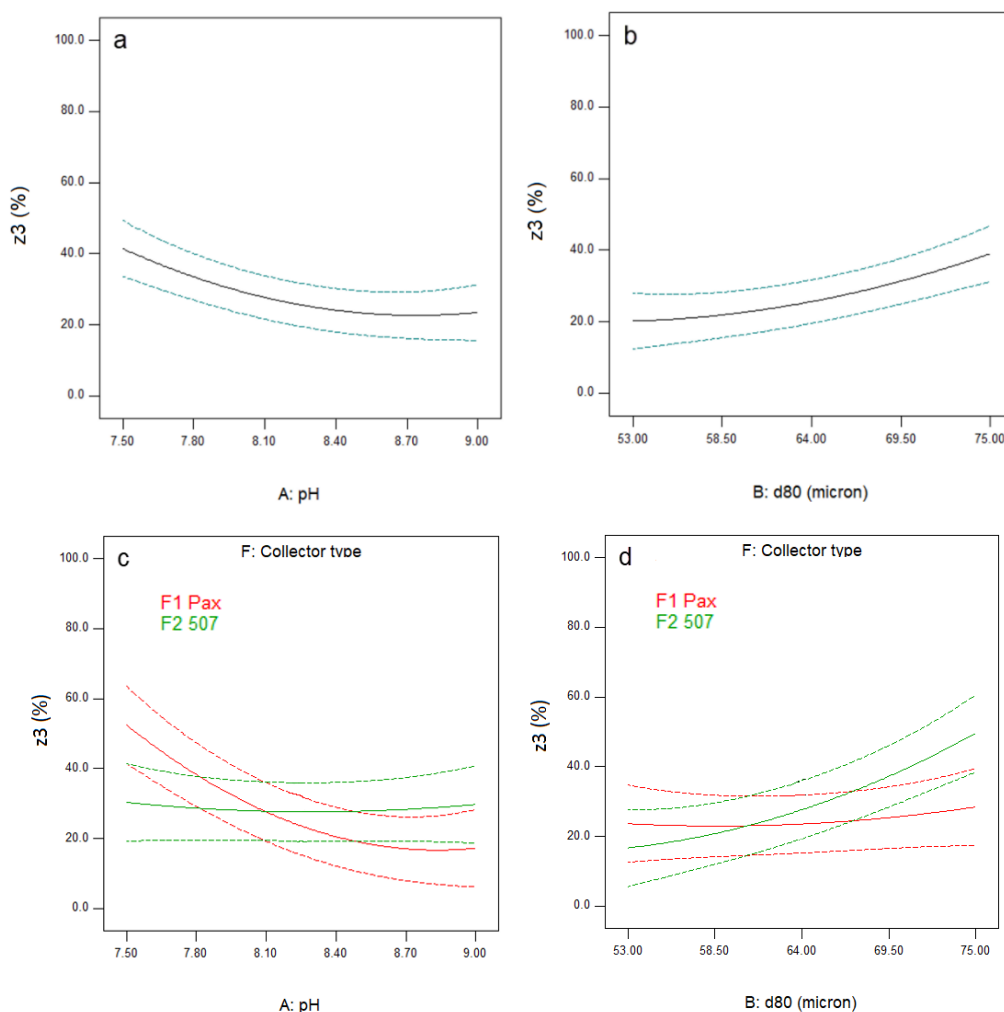
- در شکل a: با افزایش ابعاد، Z2 کاهش می‌یابد بدین معنا که با افزایش ابعاد درصد بیشتری از ذرات با نرخ سینتیک k_1 و k_3 شناور خواهند شد.
- در شکل b: در حضور PAX با افزایش pH، Z2 افزایش می‌یابد که این موضوع در حضور کلکتور 507 برعکس می‌باشد.
- در شکل c: در حضور PAX با افزایش درصد جامد، Z2 افزایش می‌یابد که این موضوع در حضور کلکتور 507 برعکس می‌باشد.
- در کل در زمان استفاده از PAX و ابعاد کوچکتر و pH و درصد جامد بیشتر مقدار مواد بیشتری با نرخ k_2 فلوته خواهند شد.



شکل ۵-۹- اثرات a: پارامتر ابعاد ذرات و اندرکنش پارامترها b: pH و نوع کلکتور و c: ابعاد ذرات و نوع کلکتور) بر Z2 (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

۵-۳-۶- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر Z3

در شکل (۵-۱۰) اثر انفرادی و اندرکنش پارامترهای مختلف بر پاسخ Z3 ارائه شده است.



شکل ۵-۱- اثر پارامترهای a: pH و b: ابعاد ذرات و اندرکنش پارامترها c: pH و نوع کلکتور و d: ابعاد ذرات و نوع کلکتور بر Z3 (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

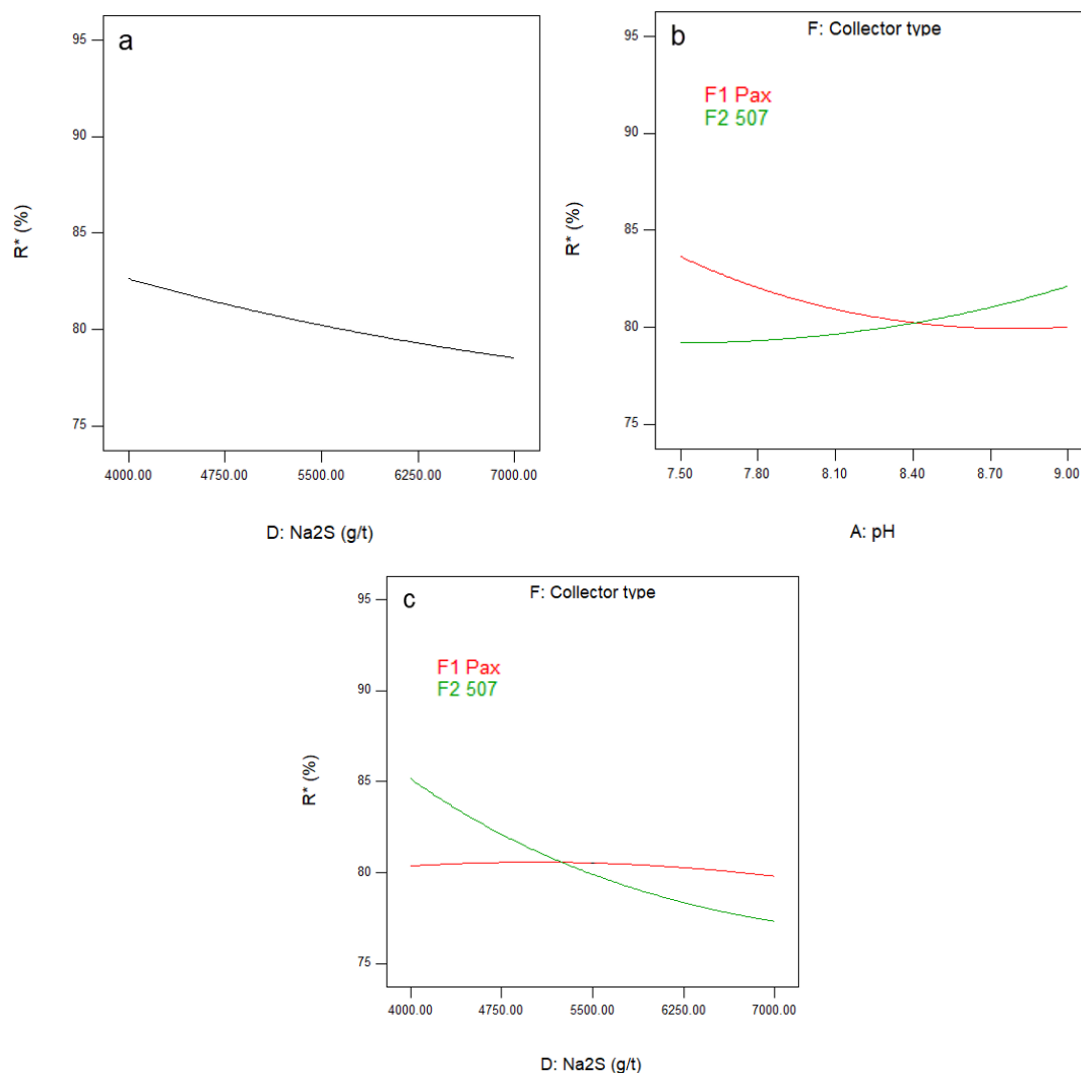
- در شکل a: با افزایش pH، Z3 کاهش می‌یابد. با افزایش pH به دلیل مقدار حداکثر S در فرم HS^- جذب سولفور بهتر صورت می‌گیرد و به همین دلیل درصد مواد شناور شونده با نرخ k_1 و k_2 افزایش می‌یابد و به دنبال آن Z3 کاهش می‌یابد.
- در شکل b: با افزایش ابعاد، Z3 افزایش می‌یابد. با افزایش ابعاد به دلیل کاهش درجه آزادی درصد کمتری از ذرات با نرخ بالا فلوته می‌شوند و درصد بیشتری از مواد با سینتیک k_3 شناور می‌شوند که می‌توان گفت Z3 افزایش می‌یابد.

- در شکل c: در حضور PAX تأثیر ارائه شده در شکل a، مشهودتر است. پیشتر گفته شد که کلکتور PAX در pH بالاتر اثربخشی بیشتری داشته و مقدار موادی که با نرخ فلوتاسیون k_1 واکنش می‌دهند بیشتر است لذا در زمان استفاده از PAX، Z3 کاهش می‌یابد.
- در شکل d: در حضور دانافلوت 507 تأثیر ارائه شده در شکل b، مشهودتر است.

۵-۳-۷- تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر R_∞

در شکل (۵-۱۱) اثر انفرادی و اندرکنش پارامترهای مختلف بر پاسخ R_∞ ارائه شده است.

پیش از آنکه به تفسیر نتایج این بخش پرداخته شود، اهمیت میزان سولفور سدیم و تأثیر آن بر فلوتاسیون اشاره شده است. چنانچه میزان آن در حد مورد نیاز باشد، یون‌های S^{2-} در محیط باقیمانده که خود به عنوان بازداشت کننده عمل می‌کند. همچنین به علت آنکه یون‌های سولفور ترجیحاً جذب گزنتات می‌شوند، مجدداً حالت بازداشت برای سروزیت پیش می‌آید (نعمت الهی، ۱۳۸۷). در ضمن مقدار بالای سولفور سدیم شرایط محیط را به سمت پتانسیل احیا سوق می‌دهد، که این موضوع نیز سبب بازداشت کانی‌ها می‌شود (Herrera-Urbina, 1999). همچنین مصرف اضافی سولفور سدیم منجر به تشکیل یون‌های HS^- شده و به سادگی در سطح کانی جذب شده و بار منفی سطح کانی را افزایش داده و باعث می‌شود که دیگر کلکتور در سطح کانی جذب نشود. در نهایت این که مصرف بیش از حد سولفور سدیم باعث از بین رفتن اکسیژن در پالپ می‌شود و واکنش سطحی را دشوار می‌سازد و بازدهی فلوتاسیون را کاهش می‌دهد (رضایی، ۱۳۷۸). از طرف دیگر، مقدار کم سولفید سدیم با سرب نامحلول واکنش داده و سولفید سرب را تشکیل می‌دهد و این ذرات کلوئیدی (سولفید سرب) بر روی سطح سروزیت می‌نشیند و از واکنش آن با کلکتور جلوگیری می‌کند (Herrera-Urbina, 1999) از این رو می‌توان گفت میزان سولفید سدیم بسیار حساس است.



شکل ۵-۱۱- اثر پارامترهای a: سولفور سدیم و اندرکنش پارامترها b: pH و نوع کلکتور و c: سولفور سدیم و نوع کلکتور) بر R_∞ (سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

همانطور که ملاحظه می‌شود:

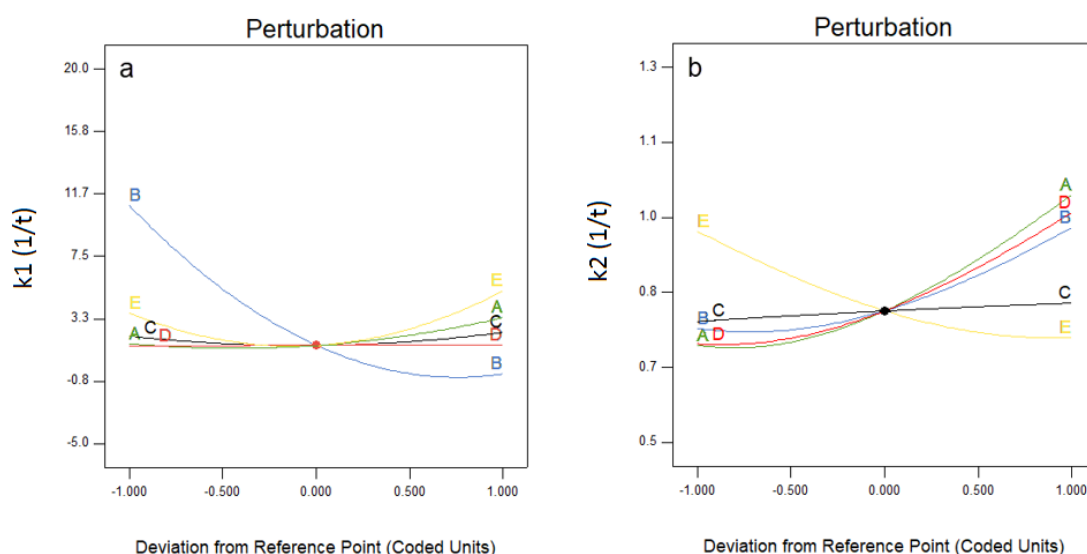
- در شکل a: با افزایش سولفور سدیم، R_∞ کاهش می‌یابد. با توجه به آنچه گفته شد مقدار اضافی سولفور سدیم می‌تواند موجبات کاهش بازیابی و در نهایت بازیابی بینهایت را فراهم کند. بنابراین در این نمونه نیز با افزایش سولفور سدیم مقدار بازیابی بی‌نهایت کاهش یافته است که دلایل آن پیشتر اشاره شد.
- در شکل b: در حضور PAX، با افزایش pH، R_∞ کاهش می‌یابد که این موضوع در حضور دانافلوت 507 برعکس می‌باشد که این موضوع اثباتی بر کارکردهای کلکتورهای مختلف در

pH های مختلف است و نشان می‌دهد کلکتورهای مختلف در pH های مختلف عملکرد متفاوتی خواهند داشت.

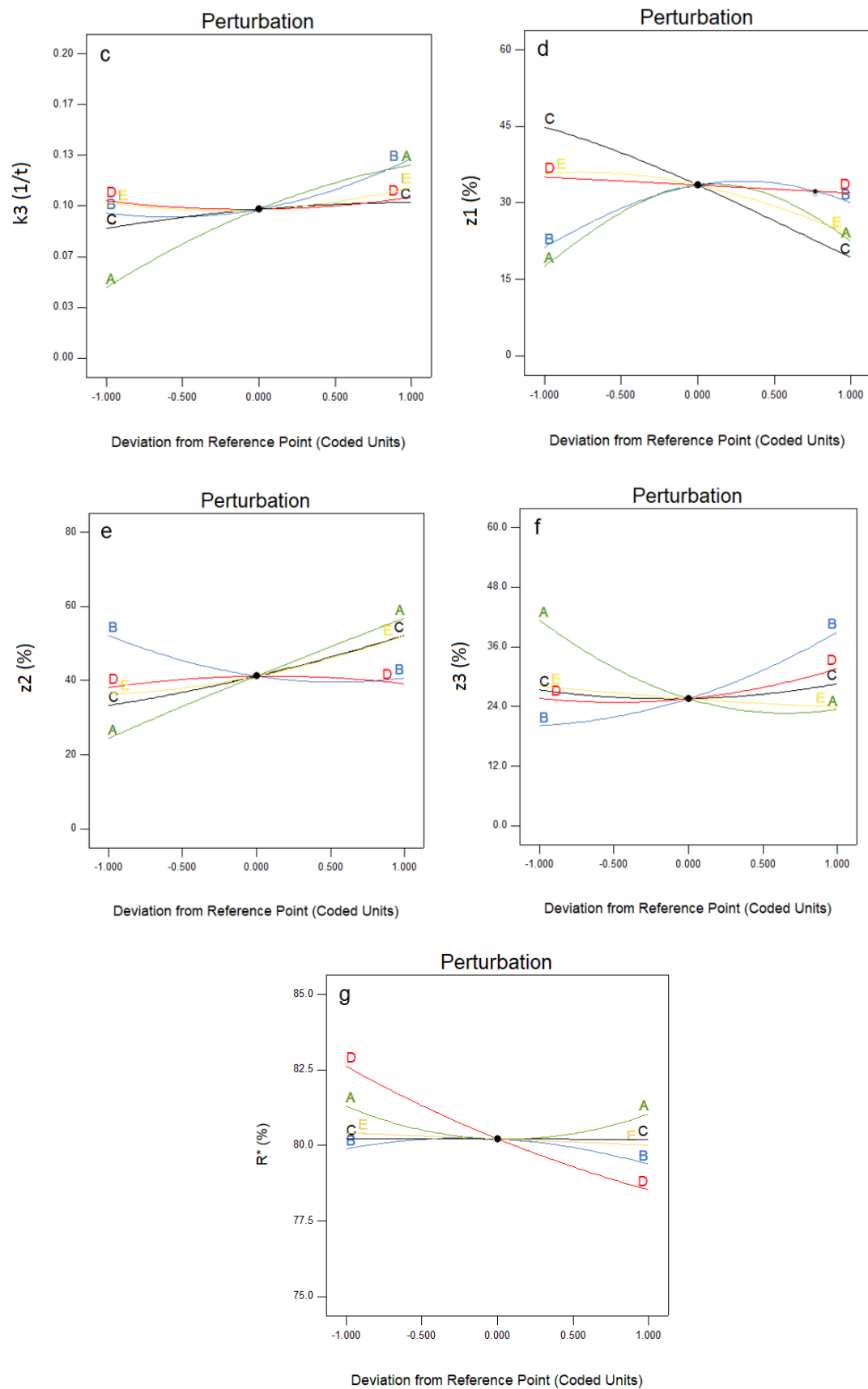
- در شکل c: در حضور دانافلوت 507، با افزایش سولفور سدیم، R_{∞} کاهش می‌یابد ولی در حضور PAX مقدار سولفور سدیم تأثیر چندانی بر R_{∞} ندارد.

۴-۵- نمودارهای آشفتگی^۱ پارامترهای مختلف بر پاسخ‌ها

نمودارهای آشفتگی هر پاسخ در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است. در این نمودارها شیب بیشتر نشان دهنده تأثیر بیشتر آن پارامتر بر پاسخ مورد نظر است. بنابراین، مؤثرترین پارامتر در k_1 اندازه ذرات است، درصد جامد کمترین تأثیر را بر k_2 دارد. مؤثرترین پارامترهای برای k_3 ، pH و اندازه ذرات هستند و مؤثرترین پارامتر بر R_{∞} مقدار سولفور سدیم است.



^۱ Perturbation graphs



شکل ۵-۱۲- نمودارهای آشفته‌گی پارامترهای مختلف بر پاسخها (a: k_1 , b: k_2 , c: k_3 , d: z_1 , e: z_2 , f: z_3 و g: R_∞)
(سایر پارامترها در نقطه مرکزی ثابت نگه داشته شده‌اند)

۵-۵- شرایط بهینه آزمایش

حداکثر و حداقل شرایط پاسخ را می‌توان با دقت بالا در رابطه با رویکرد آماری و بهینه‌سازی در فضای طراحی در روش واکنش سطح تعیین کرد [GHOSAL et al, 2013, GUNST et al, 1996, BEZERRA et al, 2008]. با توجه به معادله (۴-۲) برای دستیابی به بازیابی بیشینه نیاز است تا پاسخ‌های $k_{1,2,3}$ و R_{∞} بیشینه باشد. با توجه به آنچه که گفته شد شرایط و نتایج بهینه آزمایش‌ها در جدول (۵-۳) ارائه شده است.

جدول ۵-۳- شرایط بهینه آزمایش‌ها

پارامترهای آزمایشگاهی	شرایط بهینه	پارامترهای مدل	نتایج بهینه
pH	9.0	k_1 (1/t)	38.30
ابعاد ذرات (d_{80})	53.0	k_2 (1/t)	1.06
درصد جامد	26.3	k_3 (1/t)	0.24
سولفور سدیم	4000.0	z_1 (%)	24.0
مقدار کلکتور	1500.0	z_2 (%)	55.0
نوع کلکتور	PAX	z_3 (%)	21.0
-	-	R_{∞} (%)	80.43

۵-۶- اعتبارسنجی آزمایش تحت شرایط بهینه

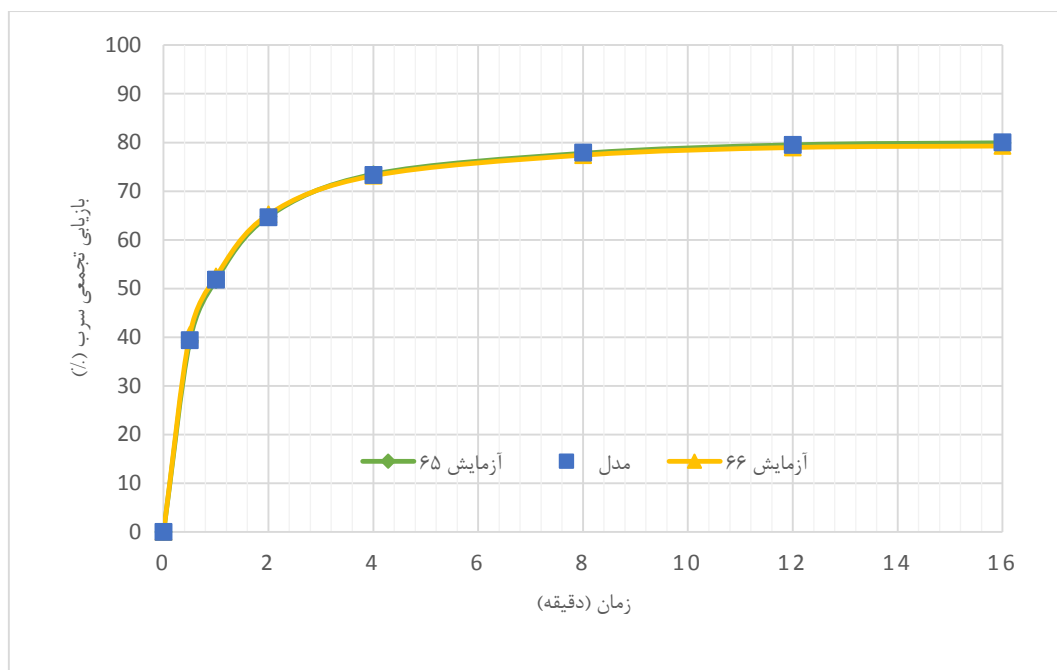
به منظور اعتبارسنجی آزمایش‌ها تحت شرایط بهینه آزمایشی انجام شد که نتایج آن در جدول (۵-۴) و (۵-۵) و شکل (۵-۱۳) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج آزمایشگاهی همبستگی بسیار خوبی با نتایج حاصل از مدل دارد. لازم به ذکر است که بازیابی محاسباتی با جایگذاری مقادیر پارامترهای مدل (جدول ۵-۳) در معادله (۴-۲) به دست آمده است. لازم به ذکر است که مقدار R^2 برای این دو آزمایش به ترتیب برابر با ۱/۰۰۰۰ و ۰/۹۹۹۸ می‌باشد.

جدول ۴-۵- نتایج آزمایش فلوتاسیون تحت شرایط بهینه (آزمایش ۶۵)

حداقل مجموع مربعات خطا	سرب (%)			وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
	بازیابی محاسباتی	بازیابی آزمایشگاهی	عیار			
0.00	0.00	0.00	6.72	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
0.03	39.41	39.24	35.24	7.48	0.5	1
0.00	51.82	51.77	34.81	10.00	1	1+2
0.02	64.64	64.81	32.59	13.37	2	1+2+3
0.02	73.33	73.46	30.68	16.10	4	1+2+3+4
0.03	77.94	77.77	28.24	18.51	8	1+2+3+4+5
0.00	79.48	79.51	26.56	20.12	12	1+2+3+4+5+6
0.02	80.07	79.93	25.47	21.09	16	1+2+3+4+5+6+7
0.12	19.93	20.07	1.71	78.91	-	باطله نهایی

جدول ۵-۵- نتایج آزمایش فلوتاسیون تحت شرایط بهینه (آزمایش ۶۶)

حداقل مجموع مربعات خطا	سرب (%)			وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
	بازیابی محاسباتی	بازیابی آزمایشگاهی	عیار			
0.00	0.00	0.00	6.55	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
1.30	39.41	40.55	39.55	6.72	0.5	1
0.45	51.82	52.49	38.20	9.00	1	1+2
0.31	64.64	65.23	34.38	12.43	2	1+2+3
0.02	73.33	73.20	31.75	15.10	4	1+2+3+4
0.27	77.94	77.43	28.65	17.70	8	1+2+3+4+5
0.25	79.48	78.99	26.80	19.31	12	1+2+3+4+5+6
0.60	80.07	79.29	25.70	20.21	16	1+2+3+4+5+6+7
3.19	19.93	20.71	1.70	79.79	-	باطله نهایی



شکل ۵-۱۳- نمودارهای مقایسه‌ای نتایج اعتبارسنجی با نتایج مدل

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- جمع‌بندی

توسعه مدل سینتیکی کانی‌های مختلف کمک می‌کند که با در دست داشتن مدل سینتیکی و ثابت سینتیکی مناسب، بدون انجام آزمایش‌های اضافه، مقدار بازیابی را در زمان‌های مختلف پیش‌بینی کرد که این موضوع سبب کاهش زمان و هزینه‌ها خواهد شد. بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه در دنیا بر روی مس و زغال بوده که این موضوع ظرفیت بالای تحقیقات آتی بر روی سایر عناصر را نشان می‌دهد.

در این تحقیق برای ساده‌سازی و درک بهتر مدل‌های فلوتاسیون به صورت زیر طبقه‌بندی گردید.

- مدل‌های با ثابت سینتیک منفرد
- مدل‌های با ثابت سینتیک متغیر
- مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون با نرخ ثابت گسسته
- مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون با توزیع نرخ ثابت پیوسته
- مدل‌های سینتیکی فلوتاسیون با نرخ متوسط
- مدل‌های سینتیکی توسعه یافته

در این تحقیق، ابتدا پس از نمونه‌برداری از باطله‌های قدیمی معدن چاه‌گز، تهیه نمونه معرف و انجام مطالعات و آنالیزهای اولیه، آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی نمونه معرف صورت گرفت. این آزمایش‌ها به صورت جامع بر روی پارامترهای زیادی و در دامنه وسیعی از مقادیر مواد شیمیایی صورت پذیرفت که در نهایت ۶ پارامتر pH در بازه ۷/۵ تا ۹/۰، ابعاد ذرات از ۵۳ تا ۷۵ میکرون، درصد جامد پالپ از ۲۵ تا ۳۵، میزان سولفور سدیم از ۴۰۰۰ تا ۷۰۰۰ گرم بر تن، میزان کلکتور از ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ گرم بر تن و نوع کلکتور PAX و 507 به عنوان مقادیر و شرایط بهینه از آزمایش‌های اولیه انتخاب شدند. با استفاده از این ۶ پارامتر در محدوده‌های اشاره شده آزمایش‌های سینتیکی فلوتاسیون با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش انجام شد و تعداد ۶۴ آزمایش به دست آمد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه انجام آزمایش‌های سینتیکی نیاز به

دقت بسیار بالا دارد و برای مقایسه بین آزمایش‌های مختلف باید تمام آزمایش‌ها یکسان انجام شود از این‌رو، برای حذف خطای انسانی، کف‌گیری به صورت خودکار انجام شد.

پس از انجام آزمایش‌های سینتیکی بیش از ۱۴۰ مدل که شامل مدل‌های پیشین و جدید می‌باشد با نتایج آزمایشگاهی تطبیق داده شد و در نهایت نتایج نشان داد که مدل گسسته ۷ پارامتری بیشترین مطابقت را از لحاظ حداقل مجموع مربعات خطا و ضریب همبستگی با نتایج آزمایشگاهی داشت. ۷ پارامتر به دست آمده از مدل ریاضی که شامل $k_1, k_2, k_3, Z_1, Z_2, Z_3$ و R_∞ می‌باشد در نرم افزار DX10 جایگذاری شد و از این طریق روابط بین پارامترهای آزمایشگاهی و پارامترهای مدل به دست آمد که این رابطه‌ها به صورت نمودار و مدل ریاضی نیز ارائه شدند. با تلفیق این مدل و مدل قبلی به دست آمده از آزمایش‌های سینتیکی فلوتاسیون مدل نهایی به دست آمد که با کمک آن بدون انجام آزمایش نیز می‌توان مقدار پارامترهای سینتیکی مدل و در نهایت بازیابی را برای حالات مختلف فلوتاسیون در هر زمان به دست آورد و بدین صورت یک تابعی از ثابت سینتیک که تابعی از عوامل عملیاتی است، معرفی شده که تاکنون در تحقیقات قبلی به آن پرداخته نشده است.

۶-۲- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحقیق را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر فلوتاسیون نمونه معرف عبارتند از: pH، ابعاد ذرات، درصد جامد، مقدار سولفور سدیم، مقدار کلکتور و نوع کلکتور
- انجام آزمایش‌های فلوتاسیون با استفاده از سیستم کف‌گیری خودکار سبب افزایش دقت و تکرارپذیری آزمایش‌ها می‌شود.
- در بین مدل‌های پیشین و جدید مدل‌های با توزیع گسسته و چند ثابت سینتیک نتایج بهتری نسبت به مدل‌های با ثابت سینتیک منفرد، ثابت سینتیک متوسط و مدل‌های با توزیع پیوسته ارائه می‌دهند.

- از بین مدل‌ها با ثابت سینتیک منفرد، معادله کلی - که تنها یک ثابت سینتیک دارد - بیشترین همبستگی را با نتایج آزمایشگاهی دارد.
- زمانی که از مدل‌های سینتیکی با ثابت سینتیکی منفرد استفاده می‌شود، مرتبه‌های بالاتر از ۱ نتایج مناسبتری ارائه می‌کنند که مناسب‌ترین مرتبه ۱/۸۷ است که به آنها شبه مرتبه دوم گفته می‌شود.
- از میان تمامی مدل‌های تحت بررسی در این تحقیق (بیش از ۱۰۰ مدل)، مدل ۷ پارامتری گسسته با ۳ ثابت سینتیک بیشترین همبستگی را با نتایج آزمایشگاهی نشان داد.
- علاوه بر مدل‌های سینتیکی با ۳ ثابت سینتیک (k_1 ، k_2 و k_3)، مدل‌های با تعداد ثابت‌های سینتیکی بیشتر نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتوانستند نتایج بهتری نسبت به مدل‌های سینتیکی با ۳ ثابت سینتیکی ارائه دهند.
- مدل‌های سینتیکی گسسته از مرتبه‌های بالاتر از ۱، نتایج نامناسبتری از مدل سینتیکی گسسته مرتبه اول و نتایج مشابه با مدل سینتیکی مرتبه دوم منفرد ارائه دادند.
- رابطه بین ثابت سینتیک و مرتبه فلوتاسیون برای تمام آزمایش‌ها به صورت یک مدل ریاضی ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ثابت سینتیک؛ مرتبه فلوتاسیون کاهش می‌یابد.
- در طول زمان کف‌گیری ثابت سینتیک از حدود ۰/۷ به ۰/۳ کاهش می‌یابد و مرتبه فلوتاسیون از حدود ۱/۵ در شروع آزمایش تا بیش از ۲/۰ در انتهای کف‌گیری افزایش می‌یابد.
- با تغییرات مرتبه فلوتاسیون بازیابی تغییرات بیشتری پیدا می‌کند و می‌توان گفت بازیابی به مرتبه فلوتاسیون حساس‌تر است.
- پس از ارائه مدل ریاضی برای رابطه بین پارامترهای مدل با پارامترهای آزمایشگاهی، نتایج نشان داد که، مؤثرترین پارامتر بر k_1 اندازه ذرات است، درصد جامد کمترین تأثیر را بر k_2 دارد. مؤثرترین پارامترهای برای k_3 ، pH و اندازه ذرات هستند و مؤثرترین پارامتر بر R_∞ مقدار سولفور سدیم است.

- شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر بازیابی به قرار زیر است.

- pH: ۹
- ابعاد ذرات: ۵۳ میکرون
- درصد جامد: حدود ۲۶/۳ درصد
- مقدار سولفور سدیم: حدود ۴۰۰۰ گرم بر تن
- مقدار کلکتور: حدود ۱۵۰۰ گرم بر تن
- نوع کلکتور: PAX

۶-۳- پیشنهادها

پس از انجام تحقیقات پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی به دست آمد که در ادامه به آن اشاره شده است.

- به تغییرات مرتبه فلوئتاسیون در طول زمان کف‌گیری در این تحقیق اشاره شده است ولی می‌توان تحقیقات گسترده‌تر و کامل‌تری بر روی آن انجام داد و این تغییرات را در نمونه‌های مختلف مقایسه کرد.

- مقایسه نتایج این تحقیق با داده‌های در مقیاس صنعتی
- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر مرتبه فلوئتاسیون و ارائه مدل ریاضی

۶-۳- نوآوری

نوآوری این تحقیق را می‌توان به شرح زیر ارائه کرد.

- ارائه یک تابع ریاضی برای محاسبه ثابت سینتیک بر حسب پارامترهای عملیاتی فلوئتاسیون و بررسی این پارامترها بر پارامترهای مدل
- ارائه یک رابطه بین ثابت سینتیک و مرتبه فلوئتاسیون به صورت یک مدل ریاضی

- ارائه یک رابطه بین ثابت سینتیک و مرتبهٔ فلوتاسیون و زمان و ارتباط آنها با بازیابی به صورت یک مدل ریاضی

همچنین در این تحقیق:

- آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی نمونهٔ سروزیت صورت گرفته که پیشتر بر روی این نمونه مدل سازی صورت نگرفته است.

- همچنین برای انجام آزمایش‌های سینتیکی فلوتاسیون از سیستم کف‌گیری خودکار استفاده شده است.

پیوست

نتایج آزمایش ۱ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.33	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.330	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
35.45	47.09	4.76	0.5	1	35.45	47.09	4.76	0.5	کنسانتره اول
50.36	38.23	8.34	1	1+2	14.91	26.41	3.57	0.5	کنسانتره دوم
64.00	30.92	13.10	2	1+2+3	13.64	18.12	4.76	1	کنسانتره سوم
72.53	24.21	18.96	4	1+2+3+4	8.53	9.22	5.86	2	کنسانتره چهارم
76.91	19.71	24.70	8	1+2+3+4+5	4.38	4.83	5.74	4	کنسانتره پنجم
79.13	17.62	28.43	12	1+2+3+4+5+6	2.22	3.77	3.73	4	کنسانتره ششم
80.80	15.74	32.50	16	1+2+3+4+5+6+7	1.67	2.60	4.07	4	کنسانتره هفتم
19.20	1.80	67.50	-	باطله نهایی	19.20	1.80	67.50	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار							توزیع	عیار
0.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
30.96	41.42	4.68	0.5	1	30.96	41.42	4.68	0.5	کنسانتره اول
44.66	34.26	8.16	1	1+2	13.70	24.63	3.48	0.5	کنسانتره دوم
59.73	28.87	12.94	2	1+2+3	15.07	19.70	4.79	1	کنسانتره سوم
68.57	22.83	18.80	4	1+2+3+4	8.84	9.45	5.85	2	کنسانتره چهارم
73.18	19.13	23.94	8	1+2+3+4+5	4.60	5.60	5.14	4	کنسانتره پنجم
75.23	17.49	26.91	12	1+2+3+4+5+6	2.05	4.32	2.97	4	کنسانتره ششم
76.60	15.83	30.27	16	1+2+3+4+5+6+7	1.37	2.55	3.36	4	کنسانتره هفتم
23.40	2.10	69.73	-	باطله نهایی	23.40	2.10	69.73	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.31	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.31	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
25.95	37.41	4.38	0.5	1	25.95	37.41	4.38	0.5	کنسانتره اول
38.63	31.88	7.65	1	1+2	12.67	24.47	3.27	0.5	کنسانتره دوم
51.74	27.82	11.74	2	1+2+3	13.11	20.22	4.09	1	کنسانتره سوم
64.21	23.52	17.22	4	1+2+3+4	12.47	14.34	5.49	2	کنسانتره چهارم
69.31	21.11	20.72	8	1+2+3+4+5	5.11	9.22	3.50	4	کنسانتره پنجم
72.46	18.15	25.20	12	1+2+3+4+5+6	3.14	4.43	4.48	4	کنسانتره ششم
75.13	15.52	30.55	16	1+2+3+4+5+6+7	2.67	3.15	5.35	4	کنسانتره هفتم
24.87	2.26	69.45	-	باطله نهایی	24.87	2.26	69.45	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.24	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.24	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
21.17	28.31	4.66	0.5	1	21.17	28.31	4.66	0.5	کنسانتره اول
34.36	25.72	8.33	1	1+2	13.19	22.42	3.67	0.5	کنسانتره دوم
51.97	24.04	13.49	2	1+2+3	17.61	21.32	5.15	1	کنسانتره سوم
64.73	21.77	18.55	4	1+2+3+4	12.77	15.73	5.06	2	کنسانتره چهارم
68.85	19.95	21.53	8	1+2+3+4+5	4.12	8.61	2.98	4	کنسانتره پنجم
73.96	16.70	27.63	12	1+2+3+4+5+6	5.11	5.23	6.10	4	کنسانتره ششم
76.06	15.36	30.88	16	1+2+3+4+5+6+7	2.10	4.03	3.25	4	کنسانتره هفتم
23.94	2.16	69.12	-	باطله نهایی	23.94	2.16	69.12	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				وزن (%)	زمان (دقیقه)			
0.00	6.36	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.36	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
25.54	42.34	3.83	0.5	1	25.54	42.34	3.83	0.5	کنسانتره اول
41.32	38.48	6.82	1	1+2	15.77	33.52	2.99	0.5	کنسانتره دوم
58.50	31.21	11.91	2	1+2+3	17.19	21.46	5.09	1	کنسانتره سوم
67.38	25.33	16.90	4	1+2+3+4	8.88	11.31	4.99	2	کنسانتره چهارم
72.59	21.14	21.82	8	1+2+3+4+5	5.22	6.74	4.92	4	کنسانتره پنجم
75.29	19.28	24.81	12	1+2+3+4+5+6	2.70	5.73	2.99	4	کنسانتره ششم
77.76	17.27	28.62	16	1+2+3+4+5+6+7	2.47	4.12	3.81	4	کنسانتره هفتم
22.24	1.98	71.38	-	باطله نهایی	22.24	1.98	71.38	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۶ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
19.40	31.30	3.88	0.5	1	19.40	31.30	3.88	0.5	کنسانتره اول
31.90	29.55	6.75	1	1+2	12.50	27.20	2.88	0.5	کنسانتره دوم
48.89	27.49	11.13	2	1+2+3	16.99	24.31	4.37	1	کنسانتره سوم
60.91	24.85	15.34	4	1+2+3+4	12.02	17.86	4.21	2	کنسانتره چهارم
69.85	21.18	20.64	8	1+2+3+4+5	8.94	10.56	5.30	4	کنسانتره پنجم
74.12	19.22	24.13	12	1+2+3+4+5+6	4.27	7.65	3.49	4	کنسانتره ششم
76.00	18.02	26.39	16	1+2+3+4+5+6+7	1.89	5.23	2.26	4	کنسانتره هفتم
24.00	2.04	73.61	-	باطله نهایی	24.00	2.04	73.61	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۷ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.000	6.265	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
35.33	47.59	4.65	0.5	1	35.33	47.59	4.65	0.5	کنسانتره اول
49.27	38.04	8.12	1	1+2	13.94	25.21	3.46	0.5	کنسانتره دوم
61.97	30.41	12.77	2	1+2+3	12.70	17.11	4.65	1	کنسانتره سوم
69.94	23.93	18.31	4	1+2+3+4	7.97	9.01	5.54	2	کنسانتره چهارم
74.41	19.44	23.98	8	1+2+3+4+5	4.46	4.93	5.67	4	کنسانتره پنجم
76.69	17.36	27.67	12	1+2+3+4+5+6	2.28	3.88	3.69	4	کنسانتره ششم
78.48	15.40	31.92	16	1+2+3+4+5+6+7	1.79	2.64	4.25	4	کنسانتره هفتم
21.52	1.98	68.08	-	باطله نهایی	21.52	1.98	68.08	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۸ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.34	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.34	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
23.13	32.42	4.52	0.5	1	23.13	32.42	4.52	0.5	کنسانتره اول
40.35	29.62	8.64	1	1+2	17.22	26.54	4.12	0.5	کنسانتره دوم
52.79	26.79	12.50	2	1+2+3	12.44	20.46	3.86	1	کنسانتره سوم
66.32	24.84	16.93	4	1+2+3+4	13.52	19.34	4.44	2	کنسانتره چهارم
77.89	21.98	22.48	8	1+2+3+4+5	11.57	13.23	5.55	4	کنسانتره پنجم
80.49	19.49	26.20	12	1+2+3+4+5+6	2.60	4.43	3.72	4	کنسانتره ششم
82.08	17.70	29.42	16	1+2+3+4+5+6+7	1.60	3.15	3.22	4	کنسانتره هفتم
17.92	1.61	70.58	-	باطله نهایی	17.92	1.61	70.58	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۹ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
28.63	36.54	4.91	0.5	1	28.63	36.54	4.91	0.5	کنسانتره اول
42.76	30.71	8.72	1	1+2	14.13	23.21	3.81	0.5	کنسانتره دوم
58.45	27.26	13.43	2	1+2+3	15.69	20.87	4.71	1	کنسانتره سوم
67.83	22.40	18.97	4	1+2+3+4	9.38	10.61	5.54	2	کنسانتره چهارم
74.53	18.54	25.18	8	1+2+3+4+5	6.70	6.76	6.21	4	کنسانتره پنجم
77.42	16.45	29.48	12	1+2+3+4+5+6	2.89	4.21	4.30	4	کنسانتره ششم
78.67	14.99	32.87	16	1+2+3+4+5+6+7	1.25	2.31	3.39	4	کنسانتره هفتم
21.33	1.99	67.13	-	باطله نهایی	21.33	1.99	67.13	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۰ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.27	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.27	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
30.43	38.30	4.98	0.5	1	30.43	38.30	4.98	0.5	کنسانتره اول
45.59	35.70	8.01	1	1+2	15.16	31.41	3.03	0.5	کنسانتره دوم
60.27	31.21	12.11	2	1+2+3	14.68	22.45	4.10	1	کنسانتره سوم
67.69	25.80	16.46	4	1+2+3+4	7.42	10.71	4.35	2	کنسانتره چهارم
74.93	21.73	21.63	8	1+2+3+4+5	7.24	8.78	5.17	4	کنسانتره پنجم
77.69	18.95	25.71	12	1+2+3+4+5+6	2.76	4.23	4.09	4	کنسانتره ششم
79.43	17.34	28.72	16	1+2+3+4+5+6+7	1.74	3.63	3.01	4	کنسانتره هفتم
20.57	1.81	71.28	-	باطله نهایی	20.57	1.81	71.28	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۱ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
23.33	37.76	3.85	0.5	1	23.33	37.76	3.85	0.5	کنسانتره اول
38.83	33.83	7.15	1	1+2	15.50	29.24	3.30	0.5	کنسانتره دوم
54.52	30.14	11.27	2	1+2+3	15.70	23.75	4.12	1	کنسانتره سوم
65.98	24.16	17.01	4	1+2+3+4	11.46	12.42	5.75	2	کنسانتره چهارم
72.10	19.50	23.03	8	1+2+3+4+5	6.11	6.33	6.02	4	کنسانتره پنجم
75.09	16.96	27.59	12	1+2+3+4+5+6	3.00	4.10	4.55	4	کنسانتره ششم
76.04	15.65	30.26	16	1+2+3+4+5+6+7	0.95	2.21	2.68	4	کنسانتره هفتم
23.96	2.14	69.74	-	باطله نهایی	23.96	2.14	69.74	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۲ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.32	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.32	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
30.33	34.45	5.56	0.5	1	30.33	34.45	5.56	0.5	کنسانتره اول
55.00	32.58	10.67	1	1+2	24.68	30.55	5.10	0.5	کنسانتره دوم
67.81	28.61	14.97	2	1+2+3	12.80	18.78	4.31	1	کنسانتره سوم
75.05	23.92	19.83	4	1+2+3+4	7.24	9.43	4.85	2	کنسانتره چهارم
80.53	20.11	25.30	8	1+2+3+4+5	5.47	6.32	5.47	4	کنسانتره پنجم
82.55	17.55	29.73	12	1+2+3+4+5+6	2.02	2.89	4.43	4	کنسانتره ششم
83.43	16.25	32.45	16	1+2+3+4+5+6+7	0.88	2.04	2.72	4	کنسانتره هفتم
16.57	1.55	67.55	-	باطله نهایی	16.57	1.55	67.55	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۳ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				وزن (%)	زمان (دقیقه)			
0.00	6.13	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.13	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
24.28	31.75	4.68	0.5	1	24.28	31.75	4.68	0.5	کنسانتره اول
36.41	29.07	7.67	1	1+2	12.13	24.88	2.99	0.5	کنسانتره دوم
51.64	26.69	11.85	2	1+2+3	15.23	22.32	4.18	1	کنسانتره سوم
63.76	22.53	17.34	4	1+2+3+4	12.12	13.54	5.48	2	کنسانتره چهارم
70.86	18.72	23.20	8	1+2+3+4+5	7.10	7.43	5.86	4	کنسانتره پنجم
73.98	16.63	27.26	12	1+2+3+4+5+6	3.12	4.70	4.06	4	کنسانتره ششم
75.54	14.51	31.89	16	1+2+3+4+5+6+7	1.57	2.07	4.64	4	کنسانتره هفتم
24.46	2.20	68.11	-	باطله نهایی	24.46	2.20	68.11	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۴ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.22	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.22	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
25.21	38.26	4.10	0.5	1	25.21	38.26	4.10	0.5	کنسانتره اول
37.05	33.80	6.82	1	1+2	11.83	27.08	2.72	0.5	کنسانتره دوم
52.27	30.59	10.63	2	1+2+3	15.22	24.85	3.81	1	کنسانتره سوم
64.87	25.69	15.72	4	1+2+3+4	12.60	15.43	5.08	2	کنسانتره چهارم
72.62	20.53	22.01	8	1+2+3+4+5	7.75	7.66	6.29	4	کنسانتره پنجم
75.79	17.68	26.67	12	1+2+3+4+5+6	3.17	4.23	4.67	4	کنسانتره ششم
77.18	15.81	30.38	16	1+2+3+4+5+6+7	1.39	2.34	3.70	4	کنسانتره هفتم
22.82	2.04	69.62	-	باطله نهایی	22.82	2.04	69.62	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۵ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.34	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.34	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
29.21	38.31	4.83	0.5	1	29.21	38.31	4.83	0.5	کنسانتره اول
41.92	34.21	7.77	1	1+2	12.71	27.45	2.93	0.5	کنسانتره دوم
56.71	30.60	11.74	2	1+2+3	14.78	23.56	3.98	1	کنسانتره سوم
68.00	27.00	15.96	4	1+2+3+4	11.29	16.98	4.21	2	کنسانتره چهارم
73.52	22.22	20.97	8	1+2+3+4+5	5.52	6.98	5.01	4	کنسانتره پنجم
75.94	19.30	24.93	12	1+2+3+4+5+6	2.42	3.87	3.96	4	کنسانتره ششم
76.88	17.49	27.85	16	1+2+3+4+5+6+7	0.94	2.05	2.92	4	کنسانتره هفتم
23.12	2.03	72.15	-	باطله نهایی	23.12	2.03	72.15	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۶ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.28	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.28	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
23.98	39.94	3.77	0.5	1	23.98	39.94	3.77	0.5	کنسانتره اول
38.06	34.12	7.00	1	1+2	14.08	27.34	3.23	0.5	کنسانتره دوم
52.82	30.05	11.03	2	1+2+3	14.76	22.98	4.03	1	کنسانتره سوم
68.45	25.79	16.66	4	1+2+3+4	15.63	17.43	5.63	2	کنسانتره چهارم
75.73	21.08	22.54	8	1+2+3+4+5	7.28	7.76	5.89	4	کنسانتره پنجم
78.97	18.35	27.00	12	1+2+3+4+5+6	3.24	4.56	4.46	4	کنسانتره ششم
80.04	16.95	29.62	16	1+2+3+4+5+6+7	1.07	2.56	2.62	4	کنسانتره هفتم
19.96	1.78	70.38	-	باطله نهایی	19.96	1.78	70.38	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۷ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.37	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.37	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
25.43	34.87	4.65	0.5	1	25.43	34.87	4.65	0.5	کنسانتره اول
40.46	31.30	8.24	1	1+2	15.03	26.67	3.59	0.5	کنسانتره دوم
56.90	28.33	12.80	2	1+2+3	16.44	22.98	4.56	1	کنسانتره سوم
70.17	24.97	17.91	4	1+2+3+4	13.27	16.54	5.11	2	کنسانتره چهارم
76.36	21.69	22.43	8	1+2+3+4+5	6.19	8.71	4.53	4	کنسانتره پنجم
79.42	19.36	26.14	12	1+2+3+4+5+6	3.06	5.26	3.71	4	کنسانتره ششم
80.30	17.84	28.67	16	1+2+3+4+5+6+7	0.87	2.20	2.53	4	کنسانتره هفتم
19.70	1.76	71.33	-	باطله نهایی	19.70	1.76	71.33	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۸ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
28.05	28.78	6.08	0.5	1	28.05	28.78	6.08	0.5	کنسانتره اول
44.18	25.53	10.79	1	1+2	16.12	21.34	4.71	0.5	کنسانتره دوم
58.13	22.84	15.87	2	1+2+3	13.95	17.12	5.08	1	کنسانتره سوم
68.48	19.80	21.55	4	1+2+3+4	10.34	11.34	5.69	2	کنسانتره چهارم
74.52	18.11	25.65	8	1+2+3+4+5	6.05	9.21	4.09	4	کنسانتره پنجم
77.35	16.70	28.87	12	1+2+3+4+5+6	2.83	5.48	3.22	4	کنسانتره ششم
78.78	15.43	31.82	16	1+2+3+4+5+6+7	1.43	3.01	2.96	4	کنسانتره هفتم
21.22	1.94	68.18	-	باطله نهایی	21.22	1.94	68.18	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۱۹ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.29	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.29	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
23.90	39.54	3.80	0.5	1	23.90	39.54	3.80	0.5	کنسانتره اول
37.10	35.25	6.62	1	1+2	13.20	29.46	2.82	0.5	کنسانتره دوم
52.02	29.99	10.91	2	1+2+3	14.91	21.88	4.29	1	کنسانتره سوم
61.78	25.84	15.04	4	1+2+3+4	9.76	14.87	4.13	2	کنسانتره چهارم
70.30	21.86	20.23	8	1+2+3+4+5	8.52	10.32	5.19	4	کنسانتره پنجم
73.80	19.62	23.65	12	1+2+3+4+5+6	3.50	6.43	3.42	4	کنسانتره ششم
75.12	18.27	25.86	16	1+2+3+4+5+6+7	1.32	3.76	2.21	4	کنسانتره هفتم
24.88	2.11	74.14	-	باطله نهایی	24.88	2.11	74.14	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۰ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
22.52	41.76	3.38	0.5	1	22.52	41.76	3.38	0.5	کنسانتره اول
36.11	38.45	5.88	1	1+2	13.59	33.99	2.50	0.5	کنسانتره دوم
51.77	33.46	9.69	2	1+2+3	15.67	25.76	3.81	1	کنسانتره سوم
64.45	30.22	13.35	4	1+2+3+4	12.68	21.65	3.67	2	کنسانتره چهارم
73.93	25.77	17.96	8	1+2+3+4+5	9.48	12.87	4.61	4	کنسانتره پنجم
77.54	23.11	21.00	12	1+2+3+4+5+6	3.61	7.43	3.04	4	کنسانتره ششم
78.84	21.49	22.97	16	1+2+3+4+5+6+7	1.29	4.12	1.97	4	کنسانتره هفتم
21.16	1.72	77.03	-	باطله نهایی	21.16	1.72	77.03	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۱ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.28	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.28	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
27.51	40.66	4.25	0.5	1	27.51	40.66	4.25	0.5	کنسانتره اول
41.10	34.82	7.42	1	1+2	13.59	26.98	3.17	0.5	کنسانتره دوم
56.34	30.35	11.67	2	1+2+3	15.25	22.54	4.25	1	کنسانتره سوم
70.49	26.47	16.73	4	1+2+3+4	14.14	17.54	5.07	2	کنسانتره چهارم
77.74	22.29	21.91	8	1+2+3+4+5	7.25	8.79	5.18	4	کنسانتره پنجم
80.41	19.98	25.28	12	1+2+3+4+5+6	2.68	4.99	3.37	4	کنسانتره ششم
82.30	17.73	29.17	16	1+2+3+4+5+6+7	1.88	3.05	3.88	4	کنسانتره هفتم
17.70	1.57	70.83	-	باطله نهایی	17.70	1.57	70.83	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۲ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.38	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.38	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
22.96	35.66	4.11	0.5	1	22.96	35.66	4.11	0.5	کنسانتره اول
35.79	31.11	7.34	1	1+2	12.83	25.33	3.23	0.5	کنسانتره دوم
50.55	26.58	12.13	2	1+2+3	14.77	19.65	4.79	1	کنسانتره سوم
63.12	23.38	17.23	4	1+2+3+4	12.57	15.76	5.09	2	کنسانتره چهارم
72.29	19.69	23.43	8	1+2+3+4+5	9.16	9.43	6.20	4	کنسانتره پنجم
75.78	17.33	27.90	12	1+2+3+4+5+6	3.50	4.99	4.47	4	کنسانتره ششم
77.35	15.83	31.18	16	1+2+3+4+5+6+7	1.57	3.05	3.28	4	کنسانتره هفتم
22.65	2.10	68.82	-	باطله نهایی	22.65	2.10	68.82	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۳ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				وزن (%)	زمان (دقیقه)			
0.00	6.20	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.20	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
21.89	41.23	3.29	0.5	1	21.89	41.23	3.29	0.5	کنسانتره اول
37.27	38.34	6.03	1	1+2	15.38	34.87	2.74	0.5	کنسانتره دوم
52.95	34.50	9.52	2	1+2+3	15.68	27.87	3.49	1	کنسانتره سوم
65.31	30.75	13.18	4	1+2+3+4	12.36	20.98	3.65	2	کنسانتره چهارم
72.75	25.52	17.68	8	1+2+3+4+5	7.44	10.24	4.51	4	کنسانتره پنجم
75.62	22.25	21.09	12	1+2+3+4+5+6	2.87	5.23	3.41	4	کنسانتره ششم
77.13	20.36	23.50	16	1+2+3+4+5+6+7	1.50	3.87	2.41	4	کنسانتره هفتم
22.87	1.86	76.50	-	باطله نهایی	22.87	1.86	76.50	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۴ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.30	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.30	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
18.38	31.04	3.73	0.5	1	18.38	31.04	3.73	0.5	کنسانتره اول
33.41	30.62	6.87	1	1+2	15.03	30.12	3.14	0.5	کنسانتره دوم
48.40	28.49	10.70	2	1+2+3	14.99	24.67	3.83	1	کنسانتره سوم
63.12	26.22	15.16	4	1+2+3+4	14.72	20.76	4.46	2	کنسانتره چهارم
71.53	21.62	20.83	8	1+2+3+4+5	8.41	9.34	5.67	4	کنسانتره پنجم
74.76	18.69	25.20	12	1+2+3+4+5+6	3.24	4.67	4.36	4	کنسانتره ششم
76.41	16.84	28.57	16	1+2+3+4+5+6+7	1.64	3.07	3.37	4	کنسانتره هفتم
23.59	2.08	71.43	-	باطله نهایی	23.59	2.08	71.43	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۵ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.24	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.24	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
24.45	37.21	4.10	0.5	1	24.45	37.21	4.10	0.5	کنسانتره اول
40.21	34.12	7.35	1	1+2	15.75	30.23	3.25	0.5	کنسانتره دوم
52.80	30.50	10.80	2	1+2+3	12.60	22.78	3.45	1	کنسانتره سوم
66.04	26.92	15.31	4	1+2+3+4	13.24	18.34	4.51	2	کنسانتره چهارم
72.43	22.11	20.44	8	1+2+3+4+5	6.38	7.76	5.13	4	کنسانتره پنجم
76.34	19.07	24.98	12	1+2+3+4+5+6	3.91	5.38	4.54	4	کنسانتره ششم
78.20	16.97	28.76	16	1+2+3+4+5+6+7	1.86	3.07	3.78	4	کنسانتره هفتم
21.80	1.91	71.24	-	باطله نهایی	21.80	1.91	71.24	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۶ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.24	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.24	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
18.94	38.65	3.06	0.5	1	18.94	38.65	3.06	0.5	کنسانتره اول
35.50	35.91	6.17	1	1+2	16.57	33.21	3.11	0.5	کنسانتره دوم
51.21	30.58	10.45	2	1+2+3	15.70	22.90	4.28	1	کنسانتره سوم
62.17	28.31	13.71	4	1+2+3+4	10.97	21.04	3.25	2	کنسانتره چهارم
72.06	24.20	18.59	8	1+2+3+4+5	9.89	12.65	4.88	4	کنسانتره پنجم
75.13	20.66	22.70	12	1+2+3+4+5+6	3.07	4.66	4.11	4	کنسانتره ششم
77.11	18.54	25.96	16	1+2+3+4+5+6+7	1.98	3.78	3.26	4	کنسانتره هفتم
22.89	1.93	74.04	-	باطله نهایی	22.89	1.93	74.04	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۷ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
19.54	37.32	3.24	0.5	1	19.54	37.32	3.24	0.5	کنسانتره اول
34.53	32.33	6.62	1	1+2	14.99	27.54	3.37	0.5	کنسانتره دوم
50.82	27.75	11.35	2	1+2+3	16.29	21.34	4.73	1	کنسانتره سوم
63.06	23.00	16.98	4	1+2+3+4	12.24	13.45	5.64	2	کنسانتره چهارم
70.93	19.31	22.75	8	1+2+3+4+5	7.87	8.45	5.77	4	کنسانتره پنجم
75.06	17.55	26.50	12	1+2+3+4+5+6	4.14	6.83	3.75	4	کنسانتره ششم
77.22	15.52	30.82	16	1+2+3+4+5+6+7	2.16	3.09	4.32	4	کنسانتره هفتم
22.78	2.04	69.18	-	باطله نهایی	22.78	2.04	69.18	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۸ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.29	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.29	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
20.46	40.65	3.17	0.5	1	20.46	40.65	3.17	0.5	کنسانتره اول
34.85	36.80	5.96	1	1+2	14.38	32.43	2.79	0.5	کنسانتره دوم
49.03	31.65	9.75	2	1+2+3	14.18	23.56	3.79	1	کنسانتره سوم
61.17	26.36	14.60	4	1+2+3+4	12.14	15.74	4.85	2	کنسانتره چهارم
70.70	21.87	20.34	8	1+2+3+4+5	9.53	10.45	5.74	4	کنسانتره پنجم
74.87	19.27	24.45	12	1+2+3+4+5+6	4.17	6.38	4.11	4	کنسانتره ششم
77.01	17.17	28.22	16	1+2+3+4+5+6+7	2.14	3.57	3.77	4	کنسانتره هفتم
22.99	2.02	71.78	-	باطله نهایی	22.99	2.02	71.78	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۲۹ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.35	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.35	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
22.16	34.54	4.07	0.5	1	22.16	34.54	4.07	0.5	کنسانتره اول
37.97	32.71	7.37	1	1+2	15.82	30.45	3.30	0.5	کنسانتره دوم
53.89	30.30	11.29	2	1+2+3	15.92	25.78	3.92	1	کنسانتره سوم
67.61	26.80	16.01	4	1+2+3+4	13.71	18.43	4.72	2	کنسانتره چهارم
75.32	21.85	21.88	8	1+2+3+4+5	7.72	8.34	5.87	4	کنسانتره پنجم
79.05	19.06	26.33	12	1+2+3+4+5+6	3.73	5.33	4.44	4	کنسانتره ششم
80.83	16.83	30.48	16	1+2+3+4+5+6+7	1.78	2.72	4.15	4	کنسانتره هفتم
19.17	1.75	69.52	-	باطله نهایی	19.17	1.75	69.52	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۰ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.07	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.07	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
20.04	33.23	3.66	0.5	1	20.04	33.23	3.66	0.5	کنسانتره اول
33.19	31.56	6.38	1	1+2	13.15	29.32	2.72	0.5	کنسانتره دوم
48.74	29.45	10.04	2	1+2+3	15.55	25.78	3.66	1	کنسانتره سوم
62.27	25.98	14.55	4	1+2+3+4	13.53	18.23	4.50	2	کنسانتره چهارم
69.91	20.96	20.24	8	1+2+3+4+5	7.64	8.14	5.70	4	کنسانتره پنجم
74.22	18.04	24.97	12	1+2+3+4+5+6	4.31	5.54	4.72	4	کنسانتره ششم
76.08	15.82	29.19	16	1+2+3+4+5+6+7	1.86	2.67	4.22	4	کنسانتره هفتم
23.92	2.05	70.81	-	باطله نهایی	23.92	2.05	70.81	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۱ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.18	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.18	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
23.67	31.23	4.68	0.5	1	23.67	31.23	4.68	0.5	کنسانتره اول
37.78	28.45	8.20	1	1+2	14.12	24.75	3.52	0.5	کنسانتره دوم
53.74	25.94	12.80	2	1+2+3	15.95	21.46	4.59	1	کنسانتره سوم
65.98	22.33	18.25	4	1+2+3+4	12.24	13.87	5.45	2	کنسانتره چهارم
73.33	19.01	23.82	8	1+2+3+4+5	7.34	8.14	5.57	4	کنسانتره پنجم
76.10	17.04	27.59	12	1+2+3+4+5+6	2.77	4.54	3.77	4	کنسانتره ششم
77.93	15.12	31.83	16	1+2+3+4+5+6+7	1.83	2.67	4.24	4	کنسانتره هفتم
22.07	2.00	68.17	-	باطله نهایی	22.07	2.00	68.17	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۲ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.18	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.18	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
22.83	33.61	4.19	0.5	1	22.83	33.61	4.19	0.5	کنسانتره اول
34.84	28.62	7.52	1	1+2	12.01	22.33	3.32	0.5	کنسانتره دوم
49.88	25.13	12.26	2	1+2+3	15.04	19.60	4.74	1	کنسانتره سوم
61.65	22.05	17.26	4	1+2+3+4	11.77	14.51	5.01	2	کنسانتره چهارم
70.99	18.75	23.38	8	1+2+3+4+5	9.34	9.43	6.12	4	کنسانتره پنجم
74.50	16.59	27.72	12	1+2+3+4+5+6	3.51	4.99	4.34	4	کنسانتره ششم
76.03	15.23	30.82	16	1+2+3+4+5+6+7	1.53	3.05	3.09	4	کنسانتره هفتم
23.97	2.14	69.18	-	باطله نهایی	23.97	2.14	69.18	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۳ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.11	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.11	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
31.27	42.60	4.49	0.5	1	31.27	42.60	4.49	0.5	کنسانتره اول
48.31	37.84	7.80	1	1+2	17.03	31.40	3.32	0.5	کنسانتره دوم
61.16	31.43	11.89	2	1+2+3	12.85	19.21	4.09	1	کنسانتره سوم
70.83	24.58	17.61	4	1+2+3+4	9.67	10.34	5.72	2	کنسانتره چهارم
75.54	20.07	23.00	8	1+2+3+4+5	4.71	5.34	5.39	4	کنسانتره پنجم
77.46	17.48	27.09	12	1+2+3+4+5+6	1.92	2.87	4.09	4	کنسانتره ششم
78.70	15.64	30.75	16	1+2+3+4+5+6+7	1.23	2.06	3.66	4	کنسانتره هفتم
21.30	1.88	69.25	-	باطله نهایی	21.30	1.88	69.25	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۴ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.20	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.20	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
25.95	39.84	4.04	0.5	1	25.95	39.84	4.04	0.5	کنسانتره اول
42.45	35.15	7.49	1	1+2	16.50	29.65	3.45	0.5	کنسانتره دوم
55.01	29.20	11.68	2	1+2+3	12.56	18.57	4.19	1	کنسانتره سوم
64.87	24.29	16.56	4	1+2+3+4	9.86	12.54	4.88	2	کنسانتره چهارم
71.49	20.01	22.14	8	1+2+3+4+5	6.62	7.34	5.59	4	کنسانتره پنجم
76.00	17.03	27.66	12	1+2+3+4+5+6	4.51	5.06	5.52	4	کنسانتره ششم
78.13	15.19	31.88	16	1+2+3+4+5+6+7	2.13	3.14	4.21	4	کنسانتره هفتم
21.87	1.99	68.12	-	باطله نهایی	21.87	1.99	68.12	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۵ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				وزن (%)	زمان (دقیقه)			
0.00	6.25	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.25	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
24.42	41.02	3.72	0.5	1	24.42	41.02	3.72	0.5	کنسانتره اول
39.62	36.18	6.84	1	1+2	15.20	30.42	3.12	0.5	کنسانتره دوم
54.34	31.59	10.75	2	1+2+3	14.73	23.54	3.91	1	کنسانتره سوم
65.40	25.79	15.85	4	1+2+3+4	11.06	13.56	5.10	2	کنسانتره چهارم
73.69	21.09	21.84	8	1+2+3+4+5	8.29	8.65	5.99	4	کنسانتره پنجم
79.00	18.35	26.91	12	1+2+3+4+5+6	5.31	6.54	5.08	4	کنسانتره ششم
81.34	16.09	31.59	16	1+2+3+4+5+6+7	2.34	3.12	4.68	4	کنسانتره هفتم
18.66	1.71	68.41	-	باطله نهایی	18.66	1.71	68.41	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۶ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.28	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.28	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
22.21	37.45	3.72	0.5	1	22.21	37.45	3.72	0.5	کنسانتره اول
34.46	31.61	6.84	1	1+2	12.25	24.65	3.12	0.5	کنسانتره دوم
47.13	26.52	11.15	2	1+2+3	12.68	18.45	4.31	1	کنسانتره سوم
59.32	22.74	16.37	4	1+2+3+4	12.18	14.66	5.21	2	کنسانتره چهارم
69.56	19.49	22.39	8	1+2+3+4+5	10.24	10.67	6.03	4	کنسانتره پنجم
74.52	17.00	27.51	12	1+2+3+4+5+6	4.96	6.08	5.12	4	کنسانتره ششم
76.55	15.22	31.56	16	1+2+3+4+5+6+7	2.04	3.15	4.05	4	کنسانتره هفتم
23.45	2.15	68.44	-	باطله نهایی	23.45	2.15	68.44	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۷ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
26.95	32.45	5.20	0.5	1	26.95	32.45	5.20	0.5	کنسانتره اول
39.88	26.64	9.38	1	1+2	12.93	19.40	4.18	0.5	کنسانتره دوم
51.59	22.47	14.38	2	1+2+3	11.70	14.65	5.00	1	کنسانتره سوم
62.58	19.21	20.41	4	1+2+3+4	11.00	11.43	6.03	2	کنسانتره چهارم
72.13	16.67	27.10	8	1+2+3+4+5	9.54	8.94	6.69	4	کنسانتره پنجم
76.45	14.92	32.10	12	1+2+3+4+5+6	4.32	5.41	5.00	4	کنسانتره ششم
78.54	13.56	36.28	16	1+2+3+4+5+6+7	2.09	3.13	4.18	4	کنسانتره هفتم
21.46	2.11	63.72	-	باطله نهایی	21.46	2.11	63.72	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۸ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.28	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.28	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
39.25	52.14	4.73	0.5	1	39.25	52.14	4.73	0.5	کنسانتره اول
53.56	40.09	8.39	1	1+2	14.31	24.54	3.66	0.5	کنسانتره دوم
63.36	29.84	13.34	2	1+2+3	9.81	12.45	4.95	1	کنسانتره سوم
70.81	23.57	18.88	4	1+2+3+4	7.45	8.45	5.54	2	کنسانتره چهارم
76.85	19.32	24.99	8	1+2+3+4+5	6.04	6.21	6.11	4	کنسانتره پنجم
79.80	16.51	30.37	12	1+2+3+4+5+6	2.95	3.45	5.38	4	کنسانتره ششم
81.12	14.79	34.47	16	1+2+3+4+5+6+7	1.32	2.02	4.10	4	کنسانتره هفتم
18.88	1.81	65.53	-	باطله نهایی	18.88	1.81	65.53	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۳۹ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
33.68	42.25	4.93	0.5	1	33.68	42.25	4.93	0.5	کنسانتره اول
45.60	33.71	8.37	1	1+2	11.92	21.45	3.44	0.5	کنسانتره دوم
59.26	27.75	13.22	2	1+2+3	13.66	17.45	4.84	1	کنسانتره سوم
68.27	22.64	18.67	4	1+2+3+4	9.01	10.24	5.45	2	کنسانتره چهارم
76.86	19.11	24.89	8	1+2+3+4+5	8.59	8.54	6.23	4	کنسانتره پنجم
79.65	16.32	30.22	12	1+2+3+4+5+6	2.79	3.24	5.32	4	کنسانتره ششم
81.05	14.56	34.46	16	1+2+3+4+5+6+7	1.40	2.04	4.25	4	کنسانتره هفتم
18.95	1.79	65.54	-	باطله نهایی	18.95	1.79	65.54	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۰ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
32.29	44.78	4.49	0.5	1	32.29	44.78	4.49	0.5	کنسانتره اول
45.68	35.20	8.09	1	1+2	13.38	23.21	3.59	0.5	کنسانتره دوم
59.21	29.03	12.71	2	1+2+3	13.53	18.24	4.62	1	کنسانتره سوم
67.88	23.24	18.20	4	1+2+3+4	8.68	9.84	5.49	2	کنسانتره چهارم
72.46	18.98	23.78	8	1+2+3+4+5	4.58	5.11	5.58	4	کنسانتره پنجم
74.45	16.82	27.58	12	1+2+3+4+5+6	1.98	3.25	3.80	4	کنسانتره ششم
76.07	14.92	31.77	16	1+2+3+4+5+6+7	1.63	2.42	4.19	4	کنسانتره هفتم
23.93	2.19	68.23	-	باطله نهایی	23.93	2.19	68.23	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۱ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.21	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.21	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
29.32	41.54	4.38	0.5	1	29.32	41.54	4.38	0.5	کنسانتره اول
41.47	34.40	7.49	1	1+2	12.15	24.31	3.10	0.5	کنسانتره دوم
55.00	28.42	12.02	2	1+2+3	13.53	18.54	4.53	1	کنسانتره سوم
64.21	23.31	17.11	4	1+2+3+4	9.21	11.24	5.09	2	کنسانتره چهارم
73.34	19.87	22.92	8	1+2+3+4+5	9.13	9.75	5.82	4	کنسانتره پنجم
77.63	17.21	28.01	12	1+2+3+4+5+6	4.30	5.24	5.09	4	کنسانتره ششم
79.80	15.58	31.82	16	1+2+3+4+5+6+7	2.17	3.54	3.80	4	کنسانتره هفتم
20.20	1.84	68.18	-	باطله نهایی	20.20	1.84	68.18	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۲ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
31.49	47.74	4.13	0.5	1	31.49	47.74	4.13	0.5	کنسانتره اول
47.30	37.69	7.85	1	1+2	15.81	26.56	3.73	0.5	کنسانتره دوم
61.77	30.78	12.56	2	1+2+3	14.47	19.24	4.71	1	کنسانتره سوم
71.55	24.62	18.19	4	1+2+3+4	9.78	10.87	5.63	2	کنسانتره چهارم
76.98	20.52	23.48	8	1+2+3+4+5	5.43	6.42	5.29	4	کنسانتره پنجم
79.64	18.19	27.40	12	1+2+3+4+5+6	2.66	4.25	3.91	4	کنسانتره ششم
81.17	16.13	31.48	16	1+2+3+4+5+6+7	1.53	2.34	4.09	4	کنسانتره هفتم
18.83	1.72	68.52	-	باطله نهایی	18.83	1.72	68.52	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۳ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.31	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.31	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
32.33	43.24	4.72	0.5	1	32.33	43.24	4.72	0.5	کنسانتره اول
45.88	35.16	8.23	1	1+2	13.54	24.31	3.51	0.5	کنسانتره دوم
58.86	29.35	12.65	2	1+2+3	12.98	18.54	4.42	1	کنسانتره سوم
69.62	23.89	18.38	4	1+2+3+4	10.76	11.84	5.73	2	کنسانتره چهارم
73.98	19.89	23.45	8	1+2+3+4+5	4.36	5.42	5.08	4	کنسانتره پنجم
76.72	17.57	27.54	12	1+2+3+4+5+6	2.74	4.22	4.09	4	کنسانتره ششم
78.40	15.67	31.56	16	1+2+3+4+5+6+7	1.69	2.65	4.02	4	کنسانتره هفتم
21.60	1.99	68.44	-	باطله نهایی	21.60	1.99	68.44	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۴ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.20	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.20	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
26.47	45.21	3.63	0.5	1	26.47	45.21	3.63	0.5	کنسانتره اول
39.57	36.40	6.74	1	1+2	13.11	26.12	3.11	0.5	کنسانتره دوم
53.86	30.77	10.86	2	1+2+3	14.29	21.54	4.11	1	کنسانتره سوم
64.37	24.81	16.09	4	1+2+3+4	10.51	12.45	5.24	2	کنسانتره چهارم
70.47	20.89	20.92	8	1+2+3+4+5	6.10	7.84	4.83	4	کنسانتره پنجم
73.71	18.46	24.77	12	1+2+3+4+5+6	3.23	5.21	3.85	4	کنسانتره ششم
75.49	16.74	27.97	16	1+2+3+4+5+6+7	1.78	3.45	3.20	4	کنسانتره هفتم
24.51	2.11	72.03	-	باطله نهایی	24.51	2.11	72.03	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۵ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				وزن (%)	زمان (دقیقه)			
0.00	6.16	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.16	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
27.98	39.12	4.41	0.5	1	27.98	39.12	4.41	0.5	کنسانتره اول
42.62	32.23	8.14	1	1+2	14.64	24.12	3.74	0.5	کنسانتره دوم
54.83	26.01	12.98	2	1+2+3	12.20	15.54	4.84	1	کنسانتره سوم
65.37	21.46	18.76	4	1+2+3+4	10.54	11.24	5.78	2	کنسانتره چهارم
71.72	17.86	24.74	8	1+2+3+4+5	6.35	6.54	5.98	4	کنسانتره پنجم
75.19	15.53	29.82	12	1+2+3+4+5+6	3.48	4.21	5.08	4	کنسانتره ششم
77.24	13.91	34.19	16	1+2+3+4+5+6+7	2.04	2.88	4.37	4	کنسانتره هفتم
22.76	2.13	65.81	-	باطله نهایی	22.76	2.13	65.81	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۶ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.16	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.16	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
24.14	46.51	3.20	0.5	1	24.14	46.51	3.20	0.5	کنسانتره اول
39.95	40.74	6.04	1	1+2	15.81	34.25	2.84	0.5	کنسانتره دوم
54.66	33.23	10.13	2	1+2+3	14.71	22.14	4.09	1	کنسانتره سوم
64.76	26.89	14.83	4	1+2+3+4	10.10	13.24	4.70	2	کنسانتره چهارم
71.37	21.93	20.04	8	1+2+3+4+5	6.60	7.81	5.21	4	کنسانتره پنجم
74.40	18.72	24.48	12	1+2+3+4+5+6	3.04	4.21	4.44	4	کنسانتره ششم
76.09	16.85	27.80	16	1+2+3+4+5+6+7	1.68	3.12	3.33	4	کنسانتره هفتم
23.91	2.04	72.20	-	باطله نهایی	23.91	2.04	72.20	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۷ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
30.38	36.40	5.16	0.5	1	30.38	36.40	5.16	0.5	کنسانتره اول
43.74	29.27	9.25	1	1+2	13.36	20.25	4.08	0.5	کنسانتره دوم
58.07	24.42	14.72	2	1+2+3	14.33	16.21	5.47	1	کنسانتره سوم
69.32	21.02	20.41	4	1+2+3+4	11.25	12.24	5.69	2	کنسانتره چهارم
75.56	17.59	26.58	8	1+2+3+4+5	6.24	6.25	6.17	4	کنسانتره پنجم
78.23	15.29	31.66	12	1+2+3+4+5+6	2.67	3.25	5.08	4	کنسانتره ششم
79.74	13.69	36.04	16	1+2+3+4+5+6+7	1.52	2.14	4.38	4	کنسانتره هفتم
20.26	1.96	63.96	-	باطله نهایی	20.26	1.96	63.96	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۸ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.26	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
29.71	41.52	4.48	0.5	1	29.71	41.52	4.48	0.5	کنسانتره اول
44.49	34.96	7.97	1	1+2	14.78	26.54	3.49	0.5	کنسانتره دوم
59.30	28.43	13.06	2	1+2+3	14.81	18.21	5.09	1	کنسانتره سوم
68.33	23.03	18.57	4	1+2+3+4	9.03	10.25	5.51	2	کنسانتره چهارم
74.62	18.77	24.88	8	1+2+3+4+5	6.29	6.24	6.31	4	کنسانتره پنجم
77.30	15.92	30.40	12	1+2+3+4+5+6	2.69	3.05	5.51	4	کنسانتره ششم
79.18	14.37	34.49	16	1+2+3+4+5+6+7	1.88	2.87	4.09	4	کنسانتره هفتم
20.82	1.99	65.51	-	باطله نهایی	20.82	1.99	65.51	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۴۹ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				وزن (%)	زمان (دقیقه)			
0.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
20.91	49.54	2.61	0.5	1	20.91	49.54	2.61	0.5	کنسانتره اول
33.06	42.56	4.81	1	1+2	12.15	34.25	2.20	0.5	کنسانتره دوم
47.68	35.09	8.41	2	1+2+3	14.62	25.12	3.60	1	کنسانتره سوم
59.28	29.41	12.48	4	1+2+3+4	11.60	17.65	4.07	2	کنسانتره چهارم
70.11	24.74	17.54	8	1+2+3+4+5	10.84	13.24	5.07	4	کنسانتره پنجم
75.39	21.16	22.05	12	1+2+3+4+5+6	5.28	7.24	4.51	4	کنسانتره ششم
77.18	18.91	25.26	16	1+2+3+4+5+6+7	1.79	3.45	3.21	4	کنسانتره هفتم
22.82	1.89	74.74	-	باطله نهایی	22.82	1.89	74.74	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۰ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.30	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.30	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
31.42	36.24	5.47	0.5	1	31.42	36.24	5.47	0.5	کنسانتره اول
50.15	31.17	10.14	1	1+2	18.73	25.24	4.68	0.5	کنسانتره دوم
61.39	27.22	14.22	2	1+2+3	11.24	17.40	4.07	1	کنسانتره سوم
69.52	23.45	18.69	4	1+2+3+4	8.13	11.45	4.48	2	کنسانتره چهارم
74.47	20.00	23.47	8	1+2+3+4+5	4.96	6.54	4.78	4	کنسانتره پنجم
76.82	17.97	26.96	12	1+2+3+4+5+6	2.34	4.24	3.49	4	کنسانتره ششم
77.62	16.61	29.45	16	1+2+3+4+5+6+7	0.80	2.02	2.50	4	کنسانتره هفتم
22.38	2.00	70.55	-	باطله نهایی	22.38	2.00	70.55	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۱ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.19	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
30.62	42.45	4.47	0.5	1	30.62	42.45	4.47	0.5	کنسانتره اول
46.71	37.78	7.66	1	1+2	16.09	31.24	3.19	0.5	کنسانتره دوم
59.79	32.27	11.48	2	1+2+3	13.07	21.21	3.82	1	کنسانتره سوم
70.39	27.10	16.09	4	1+2+3+4	10.61	14.25	4.61	2	کنسانتره چهارم
73.84	21.62	21.16	8	1+2+3+4+5	3.45	4.21	5.07	4	کنسانتره پنجم
75.99	18.65	25.24	12	1+2+3+4+5+6	2.15	3.26	4.08	4	کنسانتره ششم
77.47	16.88	28.43	16	1+2+3+4+5+6+7	1.48	2.87	3.19	4	کنسانتره هفتم
22.53	1.95	71.57	-	باطله نهایی	22.53	1.95	71.57	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۲ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.30	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.30	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
23.62	43.45	3.43	0.5	1	23.62	43.45	3.43	0.5	کنسانتره اول
38.03	38.92	6.16	1	1+2	14.41	33.24	2.73	0.5	کنسانتره دوم
52.21	34.07	9.66	2	1+2+3	14.18	25.54	3.50	1	کنسانتره سوم
63.47	29.03	13.78	4	1+2+3+4	11.26	17.21	4.12	2	کنسانتره چهارم
71.03	23.57	18.99	8	1+2+3+4+5	7.56	9.14	5.21	4	کنسانتره پنجم
74.76	20.04	23.51	12	1+2+3+4+5+6	3.74	5.21	4.52	4	کنسانتره ششم
76.66	17.74	27.24	16	1+2+3+4+5+6+7	1.90	3.21	3.73	4	کنسانتره هفتم
23.34	2.02	72.76	-	باطله نهایی	23.34	2.02	72.76	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۳ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.18	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.18	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
21.05	41.56	3.13	0.5	1	21.05	41.56	3.13	0.5	کنسانتره اول
32.47	37.39	5.37	1	1+2	11.41	31.54	2.24	0.5	کنسانتره دوم
47.18	30.82	9.46	2	1+2+3	14.72	22.21	4.09	1	کنسانتره سوم
61.18	25.74	14.69	4	1+2+3+4	13.99	16.54	5.23	2	کنسانتره چهارم
70.76	21.36	20.47	8	1+2+3+4+5	9.58	10.24	5.78	4	کنسانتره پنجم
75.22	18.67	24.90	12	1+2+3+4+5+6	4.46	6.23	4.42	4	کنسانتره ششم
77.11	16.90	28.20	16	1+2+3+4+5+6+7	1.89	3.54	3.30	4	کنسانتره هفتم
22.89	1.97	71.80	-	باطله نهایی	22.89	1.97	71.80	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۴ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.25	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.25	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
32.22	37.24	5.41	0.5	1	32.22	37.24	5.41	0.5	کنسانتره اول
47.86	31.18	9.60	1	1+2	15.64	23.35	4.19	0.5	کنسانتره دوم
61.57	26.93	14.30	2	1+2+3	13.72	18.24	4.70	1	کنسانتره سوم
67.81	24.25	17.48	4	1+2+3+4	6.24	12.25	3.18	2	کنسانتره چهارم
72.22	22.05	20.48	8	1+2+3+4+5	4.41	9.21	3.00	4	کنسانتره پنجم
75.12	20.44	22.98	12	1+2+3+4+5+6	2.89	7.24	2.50	4	کنسانتره ششم
76.07	19.17	24.81	16	1+2+3+4+5+6+7	0.95	3.25	1.83	4	کنسانتره هفتم
23.93	1.99	75.19	-	باطله نهایی	23.93	1.99	75.19	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۵ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.29	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.29	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
22.83	34.69	4.14	0.5	1	22.83	34.69	4.14	0.5	کنسانتره اول
36.50	30.41	7.55	1	1+2	13.67	25.21	3.41	0.5	کنسانتره دوم
49.84	26.06	12.03	2	1+2+3	13.34	18.74	4.48	1	کنسانتره سوم
58.50	21.82	16.87	4	1+2+3+4	8.66	11.26	4.84	2	کنسانتره چهارم
66.78	19.05	22.06	8	1+2+3+4+5	8.28	10.04	5.19	4	کنسانتره پنجم
72.16	17.35	26.17	12	1+2+3+4+5+6	5.39	8.25	4.11	4	کنسانتره ششم
74.05	15.74	29.61	16	1+2+3+4+5+6+7	1.89	3.45	3.44	4	کنسانتره هفتم
25.95	2.32	70.39	-	باطله نهایی	25.95	2.32	70.39	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۶ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
28.80	47.25	3.80	0.5	1	28.80	47.25	3.80	0.5	کنسانتره اول
40.64	40.04	6.32	1	1+2	11.85	29.21	2.53	0.5	کنسانتره دوم
52.89	33.78	9.76	2	1+2+3	12.25	22.24	3.43	1	کنسانتره سوم
64.24	28.89	13.85	4	1+2+3+4	11.35	17.25	4.10	2	کنسانتره چهارم
72.96	24.33	18.68	8	1+2+3+4+5	8.72	11.25	4.83	4	کنسانتره پنجم
77.45	21.51	22.44	12	1+2+3+4+5+6	4.49	7.45	3.75	4	کنسانتره ششم
79.56	19.41	25.54	16	1+2+3+4+5+6+7	2.12	4.25	3.10	4	کنسانتره هفتم
20.44	1.71	74.46	-	باطله نهایی	20.44	1.71	74.46	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۷ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				وزن (%)	زمان (دقیقه)			
0.00	6.25	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.25	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
24.37	37.25	4.09	0.5	1	24.37	37.25	4.09	0.5	کنسانتره اول
36.85	31.61	7.28	1	1+2	12.48	24.40	3.20	0.5	کنسانتره دوم
50.54	26.93	11.73	2	1+2+3	13.69	19.25	4.44	1	کنسانتره سوم
61.96	23.59	16.41	4	1+2+3+4	11.42	15.24	4.68	2	کنسانتره چهارم
70.95	20.25	21.88	8	1+2+3+4+5	8.98	10.25	5.47	4	کنسانتره پنجم
75.50	17.82	26.46	12	1+2+3+4+5+6	4.55	6.21	4.58	4	کنسانتره ششم
77.46	15.98	30.28	16	1+2+3+4+5+6+7	1.96	3.21	3.82	4	کنسانتره هفتم
22.54	2.02	69.72	-	باطله نهایی	22.54	2.02	69.72	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۸ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.23	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
29.75	38.42	4.83	0.5	1	29.75	38.42	4.83	0.5	کنسانتره اول
46.48	32.44	8.93	1	1+2	16.73	25.41	4.10	0.5	کنسانتره دوم
59.53	28.25	13.13	2	1+2+3	13.05	19.35	4.20	1	کنسانتره سوم
67.62	25.96	16.24	4	1+2+3+4	8.09	16.24	3.10	2	کنسانتره چهارم
74.92	22.06	21.16	8	1+2+3+4+5	7.30	9.24	4.93	4	کنسانتره پنجم
79.06	19.64	25.09	12	1+2+3+4+5+6	4.14	6.57	3.93	4	کنسانتره ششم
80.66	18.07	27.82	16	1+2+3+4+5+6+7	1.60	3.65	2.73	4	کنسانتره هفتم
19.34	1.67	72.18	-	باطله نهایی	19.34	1.67	72.18	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۵۹ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.30	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.30	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
29.67	42.48	4.40	0.5	1	29.67	42.48	4.40	0.5	کنسانتره اول
45.29	35.21	8.10	1	1+2	15.62	26.57	3.70	0.5	کنسانتره دوم
58.26	30.32	12.10	2	1+2+3	12.97	20.42	4.00	1	کنسانتره سوم
66.87	26.65	15.80	4	1+2+3+4	8.61	14.65	3.70	2	کنسانتره چهارم
74.53	22.88	20.51	8	1+2+3+4+5	7.65	10.24	4.71	4	کنسانتره پنجم
79.37	20.40	24.50	12	1+2+3+4+5+6	4.84	7.64	3.99	4	کنسانتره ششم
81.60	18.48	27.80	16	1+2+3+4+5+6+7	2.23	4.25	3.30	4	کنسانتره هفتم
18.40	1.61	72.20	-	باطله نهایی	18.40	1.61	72.20	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۶۰ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.20	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.20	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
29.59	48.26	3.80	0.5	1	29.59	48.26	3.80	0.5	کنسانتره اول
44.83	43.38	6.41	1	1+2	15.24	36.25	2.61	0.5	کنسانتره دوم
57.10	35.95	9.85	2	1+2+3	12.27	22.12	3.44	1	کنسانتره سوم
67.60	30.25	13.85	4	1+2+3+4	10.50	16.24	4.01	2	کنسانتره چهارم
74.72	25.51	18.16	8	1+2+3+4+5	7.12	10.25	4.31	4	کنسانتره پنجم
78.39	22.63	21.47	12	1+2+3+4+5+6	3.67	6.87	3.31	4	کنسانتره ششم
79.98	20.38	24.33	16	1+2+3+4+5+6+7	1.59	3.45	2.86	4	کنسانتره هفتم
20.02	1.64	75.67	-	باطله نهایی	20.02	1.64	75.67	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۶۱ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار								
0.00	6.17	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.17	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
23.63	35.40	4.12	0.5	1	23.63	35.40	4.12	0.5	کنسانتره اول
37.17	30.47	7.52	1	1+2	13.55	24.51	3.41	0.5	کنسانتره دوم
50.92	26.32	11.93	2	1+2+3	13.74	19.24	4.40	1	کنسانتره سوم
61.63	22.95	16.56	4	1+2+3+4	10.72	14.26	4.63	2	کنسانتره چهارم
69.42	19.68	21.75	8	1+2+3+4+5	7.79	9.25	5.19	4	کنسانتره پنجم
74.17	17.53	26.09	12	1+2+3+4+5+6	4.75	6.75	4.33	4	کنسانتره ششم
76.18	15.98	29.39	16	1+2+3+4+5+6+7	2.01	3.75	3.31	4	کنسانتره هفتم
23.82	2.08	70.61	-	باطله نهایی	23.82	2.08	70.61	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۶۲ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.17	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.17	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
35.49	39.50	5.54	0.5	1	35.49	39.50	5.54	0.5	کنسانتره اول
47.71	33.48	8.79	1	1+2	12.21	23.21	3.25	0.5	کنسانتره دوم
57.87	29.18	12.24	2	1+2+3	10.17	18.20	3.45	1	کنسانتره سوم
65.42	26.40	15.29	4	1+2+3+4	7.55	15.26	3.05	2	کنسانتره چهارم
71.96	23.09	19.22	8	1+2+3+4+5	6.54	10.25	3.94	4	کنسانتره پنجم
75.33	21.06	22.07	12	1+2+3+4+5+6	3.37	7.31	2.85	4	کنسانتره ششم
76.40	19.50	24.17	16	1+2+3+4+5+6+7	1.07	3.14	2.10	4	کنسانتره هفتم
23.60	1.92	75.83	-	باطله نهایی	23.60	1.92	75.83	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۶۳ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار							توزیع	عیار
0.00	6.27	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.27	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
29.63	43.21	4.30	0.5	1	29.63	43.21	4.30	0.5	کنسانتره اول
42.13	35.66	7.41	1	1+2	12.50	25.21	3.11	0.5	کنسانتره دوم
54.21	29.97	11.34	2	1+2+3	12.08	19.25	3.93	1	کنسانتره سوم
65.28	26.34	15.54	4	1+2+3+4	11.08	16.54	4.20	2	کنسانتره چهارم
74.01	22.78	20.36	8	1+2+3+4+5	8.73	11.34	4.83	4	کنسانتره پنجم
78.02	20.58	23.77	12	1+2+3+4+5+6	4.01	7.39	3.40	4	کنسانتره ششم
79.76	18.75	26.67	16	1+2+3+4+5+6+7	1.74	3.75	2.90	4	کنسانتره هفتم
20.24	1.73	73.33	-	باطله نهایی	20.24	1.73	73.33	-	باطله نهایی

نتایج آزمایش ۶۴ بر روی نمونه معرف

تجمعی					سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح
سرب (%)		وزن (%)	زمان (دقیقه)	شرح					
توزیع	عیار				توزیع	عیار			
0.00	6.15	100.00	0	خوراک (محاسباتی)	100.00	6.15	100.00	0	خوراک (محاسباتی)
31.16	41.24	4.65	0.5	1	31.16	41.24	4.65	0.5	کنسانتره اول
43.35	32.66	8.17	1	1+2	12.19	21.32	3.52	0.5	کنسانتره دوم
55.68	27.89	12.29	2	1+2+3	12.33	18.42	4.12	1	کنسانتره سوم
65.89	23.81	17.03	4	1+2+3+4	10.21	13.25	4.74	2	کنسانتره چهارم
74.19	20.41	22.38	8	1+2+3+4+5	8.30	9.56	5.35	4	کنسانتره پنجم
78.68	18.05	26.82	12	1+2+3+4+5+6	4.48	6.21	4.44	4	کنسانتره ششم
79.92	16.09	30.57	16	1+2+3+4+5+6+7	1.24	2.04	3.75	4	کنسانتره هفتم
20.08	1.78	69.43	-	باطله نهایی	20.08	1.78	69.43	-	باطله نهایی

- ۱- آقای م.، دهقانی ع.، (۱۳۹۳)، "بررسی سینتیکی فلوتاسیون کارخانه زغالشویی طبس"، کنگره ملی زغالسنگ ایران، ص ۱-۸، شاهرود.
 - ۲- بنیسی ص.، (۱۳۸۷)، "جزوه درسی کنترل و مدل سازی"، فصل دوم، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.
 - ۳- دارابی ح.، (۱۳۹۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "جایگزینی سلول مکانیکی با سلول ستونی در مرحله کلینر فلوتاسیون روی سولفیدی کارخانه باما"، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان.
 - ۴- رضایی ب.، (۱۳۷۵)، "فلوتاسیون"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه هرمزگان.
 - ۵- شاهچراغی س ه.، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی پارامترهای عملیاتی بر سینتیک فلوتاسیون کانی های سولفیدی مس"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
 - ۶- قربانی م.، ۱۳۷۹، "ذخایر سرب و روی در ایران: سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، صفحه ۱ تا ۳۱۹.
 - ۷- گلپایگانی م.، عبدالله زاده ع.، کیانی بروجنی، ف.، (۱۳۹۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "امکان-سنجی استحصال سرب از سربره حاصل از ذوب سرب به روش شستشوی نمکی"، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان.
 - ۸- نعمت الهی ح.، (۱۳۸۷)، "کانه آرای"، جلد دوم، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۶۰۳.
 - ۹- وزیری س. م.، کلاهدوزان م.، یاراحمدی م. ر. (۱۳۸۲)، "تعیین ظرفیت حمل جامد و ثابت سینتیکی مرتبه اول برای مولیبدنیت با استفاده از ستون فلوتاسیون پایلوت در کارخانه آزمایشی تغلیظ مجتمع مس سرچشمه" نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۴، صفحه ۴۰۱-۴۰۶.
- 1- Abkhoshk E., Kor M., Rezai B., (2010), "A study on the effect of particle size on coal flotation kinetics using fuzzy logic", Expert systems with applications, 37, p.p. 5201-5207.
 - 2- Agar G.E., Barrett J.J., (1983), "The use of flotation rate data to evaluate reagents", Mineral processing, 76, No. 851, p.p. 157-162.
 - 3- Agar G.E., (1985), "The optimization of flotation circuit design from laboratory rate data", Proceedings XVth Intern. Miner. Process. Congress (Cannes), 2. p.p. 100-111.
 - 4- Ahmed N., and Jameson G.J., (1985), "The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles", International Journal of mineral processing, 14, p.p. 195-215.

- 5- Ai G., Yang X., Li X., (2017), "Flotation characteristics and flotation kinetics of fine wolframite", Powder Technology, 305, p.p. 377-381
- 6- Al-Thyabat S. (2009), "Investigating the effect of some operating parameters on phosphate flotation kinetics by neural network" Advanced Powder Technology, 20, p.p. 355-360.
- 7- Alves dos Santos N., Galery R., (2018), "Modelling flotation per size liberation class – Part 2 – Evaluating flotation per class", 129, p.p. 24-36.
- 8- Amelunxen P., LaDouceur R., Amelunxen R., Young C., (2018), "A phenomenological model of entrainment and froth recovery for interpreting laboratory flotation kinetics tests", Minerals Engineering, 125, p.p. 60-65.
- 9- Arbiter N., (1951), "Flotation rates and flotation efficiency", Minerals Engineering, 3, p.p. 791-796.
- 10- Arbiter N., and Harris C.C. (1962), "Flotation kinetics", in D.W. Fuerstenau (ed.) Froth Flotation, AIME, New York, p.p. 215-246.
- 11- Azizi A., Hassanzadeh A., Fadaei B., (2015), "Investigating the first-order flotation kinetics models for Sarcheshmeh copper sulfide ore", International Journal of Mining Science and Technology.
- 12- Bahrami A., Kazemi F., Ghorbani Y., (2019), "Effect of different reagent regime on the kinetic model and recovery in gilsonite flotation", Journal of materials research and technology, 8 (5), p.p. 4498-4509.
- 13- Ball B., Kapur P. C. and Fuerstenau, D.W., (1970), "Prediction of grade-recovery curves from a flotation kinetic model", Transactions of the Metallurgical Society of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. New York, 247, p.p. 263–269.
- 14- Beloglazov K.F., (1939), "Kinetics of flotation process", Tsvetnye Metally, 2, p.p. 70-76.
- 15- Bezerra M. A., Santelli R., Oliveira E.P., Villar L.S., Escalera L.A., (2008) "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry", Talanta, 76, p.p. 965-977,
- 16- Bogdanov O.S., Podniak A.K., (1959), Rep. Invest. Of Mechanobr Inst., 124, Leningrad, Russian.
- 17- Bogdanov O.S., Hainman V.J., Maximov I.I., (1964), "On certain physical- mechanical factors determining the rate of flotation". Proc. VII IMPC, New York, Gordon & Breach, p.p. 169-174.

- 18- Brozek M., Mlynarczykowska A., (2007), "Analysis of kinetics models of batch flotation", *Mineral processing*, 41, p.p. 51-65.
- 19- Bu X., Ge L., Peng Y., Ni Ch., (2017), "Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery", *Physicochemical problems in mineral processing*, 53 (1), p.p. 342-365.
- 20- Bull W.R., (1966), "The rates of flotation of mineral particles in sulphide ores", *Australian immunology processing*, 220, p.p. 69-78.
- 21- Burden L. Richard and Faires J. (1985), "Numerical Analysis", 3rd Edition, By Boston Na. Prindle Weber & Schmidt.
- 22- Bushell E.H.G., (1962), "Kinetics of flotation", *Trans. AIME (Mining) ill*, p.p. 266-278.
- 23- Chen S., Tao X., Wang S., Tang L., Liu Q., Li L., (2019), "Comparison of air and oily bubbles flotation kinetics of long-flame coal", *Fuel*, 236, p.p. 636-642.
- 24- Chen Z.M. and Wu D.C., (1978), "A study of flotation kinetics (1)", *Nonferrous metals, Transactions of Mineral processing*, No.10, p.p. 28-33.
- 25- Chen Z.M. and Mular L., (1982), "A study of flotation kinetics - A kinetic model for continuous flotation", *Nonferrous metals, Transactions of Mineral processing*, No. 3 Trans, *Mineral Proc.*, p.p. 38-43.
- 26- Debruyne P.L., and Modi H.J., (1956), "Particle size and flotation rate of quartz", *Mineral engineering*, 8, p.p. 415-419.
- 27- Diao J., Fuerstenau D.W., Hanson J.S., (1992), "Kinetics of coal flotation", *SME-AIME annual Meeting*, Phoenix, AZ, Preprint, 92.
- 28- Dowling E.C., Klimpel R.R., and Aplan F.F., (1985), "Model Discrimination in the Flotation of a Porphyry Copper Ore", *Minerals and Metallurgical Processing*, 2, p.p. 87-101.
- 29- Ek C., (1968), "Contribution a l'etude cinétique de la flottation", *Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège* Q. p.p. 3-61.
- 30- EK C., (1991), "Innovations in Flotation Technology, FLOTATION KINETICS", *University of Liège, Rue Armand Slevart, 2, B-4000 Liège 1, Belgium*, 208, p.p. 183-210.
- 31- Fenga Q., Wena S., Deng J., Zhaob W., (2017), "Combined DFT and XPS investigation of enhanced adsorption of sulfide species onto cerussite by surface modification with chloride", *Applied Surface Science*, 425, p.p. 8-15.

- 32- Feng Q.C., Wen S.M., Zhao W.J., Deng J.S., Xian Y.J., (2016), "Adsorption of sulfide ionson cerussite surfaces and implications for flotation", *Applied Surface Science*, 360, p.p. 365–372.
- 33- Feng Q.C., Wen S.M., Zhao W.J., Wang Y.J., Cui C.F., (2015), "Contribution of chlorideions to the sulfidization flotation of cerussite", *Mineral Engineering*, 83, p.p. 128–135.
- 34- Garcia-Zuniga H., (1935), "The efficiency obtained by flotation is an exponential function of time", *Boletin Minero de la Sociedad National de Minero*, 47, Santiago, p.p. 83-86.
- 35- Garcia-Zuniga H., (1935), "La recuperacion por flotacion es una funcion exponencial del tiempo (flotation recovery is an exponential function of time)", *Boletin minero Sociedad Nacional de Minería*, Santiago, 417, p.p. 83–86.
- 36- Gaudin A.M., Schumann R, and Schlechten A.W., (1942), "Flotation kinetics- The effect of size on the behaviour of galena particles", *Journal of Physical Chemistry*, 46, p.p. 902-910.
- 37- Ghosal A., Manna A., (2013) "Response surface method based optimization of ytterbium fiberl aser parameter during machining of Al/Al₂O₃-MMC", *Optics & Laser Technology*, 46, p.p. 67-76.
- 38- Gunst R. F., (1996), "Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments", *Technometrics*, p.p. 284–286.
- 39- Harris C.C., and Rimmer H.W., (1966), "Study of a two-phase model of the flotation process", *Transactions of Australian immunology processing*, Series C, p.p. 153-162.
- 40- Harris C.C. and Chakravarti A., (1970), "Semi-batch froth flotation kinetics; species distribution analysis", *Transactions of the Metallurgical Society of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 247, p.p. 162-172.
- 41- Hernainz Bermudez De Castro F. and Calero De Hoces M., (1995), "Flotation rate of celestite and calcite", *Chemical engineering science*, 51, 1, p.p. 119-125.
- 42- Hernainz Bermudez De Castro F. and Calero De Hoces M., (2000), "froth flotation: kinetics models based on chemical analogy" *Chemical engineering and processing*, 40, p.p. 269-275.
- 43- Herrera-Urbina R., Sotillo F.J., Fuerstenau D.W., (1999), "Effect of sodium sulfideadditions on the pulp potential and amyl xanthate flotation of cerussite and galena", *International journal of Mineral processing*, 55, p.p. 157–170.

- 44- Horst W.R., and Morris T.M., (1956), "Can flotation rates be improved?", journal of mineral engineering, 157, p.p. 81-83.
- 45- Huber-Panu H., (1956), "Beitriige zur Kinetik der Flotation", Revue de Metallurgie (Bucarest), 1, p.p. 113-120.
- 46- Huber-Panu H., and Georgescu B., (1959), "Sur les equations cinetiques des indices techniques de la flottation", Revue de Metallurgie (Bucarest), 2, p.p. 189-211.
- 47- Huber-Panu H. and Georgescu B., (1961), "Untersuchungen aber den Einfluss der Belaftung auf die Flotation-kinetik", Revue de Metallurgie (Bucarest), 6, p.p. 253-267.
- 48- Huber-Panu H., Ene-Danalache E. and Cojocariu D.G., (1976), "Mathematical models of batch and continuous flotation", M.C. Fuerstenau (ed.) Flotation, Transactions of the Metallurgical Society of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, p.p. 675-724.
- 49- Hukki R.T., (1953), "Discussion of ref. [61], journal of mineral engineering, 1, p.p. 1122-1124.
- 50- Imaizumi T. and Inoue T., (1963), "Consideration cinetique sur la flottation a la mousse", Proceedings VIth Int. Miner. Process. Congress (Cannes), p.p. 699-715.
- 51- Jancarek J., (1964), "Ein Beitrag zur Theorie der Flotation sgeschwindigkeit", Bergakademie, 4-5, p.p. 257-263.
- 52- Jowett A. and Scofield S.M.M., (1960), "Refinements in methods of determining flotation rate", Transactions of the Metallurgical Society of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 217, p.p. 351-357.
- 53- Jowett A., (1961), "Investigation of residence time of fluid in froth flotation cells", British chemical engineering, 6, p.p. 254-258.
- 54- Jowett A., (1974), "Resolution of flotation recovery curves by a difference plot method", Transactions of Australian immunology processing, 70, p.p. 191-204.
- 55- Jowett A., (1980), "Formation and disruption of particle-bubble aggregates in flotation", in Fine Particles processing (Ed. P. Somasundaran), p.p. 720-754.
- 56- Kalapudas R., (1985), "A study of scaling-up of laboratory batch flotation data to industrial size flotation". International Journal of Mineral Processing, p.p. 112-121.
- 57- Kapur P.C. and Mehrotra S.P., (1989), "Modelling of flotation kinetics and design of optimum flotation circuits", K. V.S. Sastry and M.C. Fuerstenau (eds.) Challenges in Mineral Processing, AIME, New York, p.p. 300-322.
- 58- Kaya M. and Laplante A.R., (1985), "Investigation of batch and continuous flotation kinetics in a modified Denver laboratory cell", Proceedings 24th CIM Conf., 4, p.p. 18.

- 59- Kelsall D.F., (1961), "Application of probability assessment of flotation systems", Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 70, p.p. 191-204.
- 60- Klimpel R.R., Hansen R.D., Mayer W.C. and Nimerick K.H., (1979), "Laboratory characterisation of the influence of reagent changes on coal flotation", SME-AIME, Preprint, p.p. 79-11.
- 61- Klimpel R.R., (1980), "Selection of chemical reagents for flotation", SME-AIME, Preprint, p.p. 80-34.
- 62- Klimpel R.R., Hansen R., (1981), "Some Factors Influencing Kinetics in Sulfide Flotation", SME-AIME, 208, Preprint, p.p. 81-14.
- 63- Klimpel, R.R., (1988), "Methods of improving the economic performance of industrial scale mineral flotation circuits, SME-AIME, Preprint, p.p. 88-171.
- 64- Kor M., Abkhoshk E., Gharibie Kh., Shafaei S Z., (2010), "An investigation of the particle size effect on coal flotation kinetics using multivariable regression", International Journal of Medical Engineering and Informatics, 1, No.1.
- 65- Korbahti B.K., Rauf M.A., (2009), "Determination of optimum operating conditions of carmine decoloration by UV/H₂O₂ using response surface methodology", Journal of Hazardous Materials, 161. p.p. 281–286.
- 66- Krstev A., Krstev B., Golomeov B., Golomeova M., Zendelska A., Geoccev Z., Zivanovik J., (2013), "The kinetics modelling from domestic ore using software tools", Balkanmine, Ohrid.
- 67- Laplante A.R, Toguri I.M. and Smith H.W., (1983), "The effect of air flow rate on the kinetics of flotation. Part 1: the transfer of material from the slurry to the froth", International journal of mineral processing, 11, p.p. 203-219.
- 68- Laplante A.R, Smith H.W. and Toguri I.M., (1983), "The effect of air flow rate on the kinetics of flotation. Part 2: the transfer of material from the froth over the cell lip", International journal of mineral processing, 11, p.p. 221-234.
- 69- Laplante A.R, Smith H.W. and Toguri I.M., (1984), "The effect of air flow rate on the Kinetics of flotation. Part 3: selectivity", International journal of mineral processing, p.p. 285-295.
- 70- Lazic R., (2004), "Design of Experiments in Chemical Engineering".
- 71- Li N., Li Y., Fu X., Gao F., Zhang C., Xia W., Liang L., (2018), "Flotation kinetics of coal in the Inflatable Cyclonic Flotation Column", Powder Technology, 335 (15), p.p. 204-210.

- 72- Liu C., Zhang W., Song S., Li H., Jiao X., (2018), "A novel insight of the effect of sodium chloride on the sulfidization flotation of cerussite", Powder technology, 344 (15), p.p. 103-107.
- 73- Loveday B.K., (1966), "An investigation into the kinetics of froth flotation", Ph.D. Thesis, University of Natal.
- 74- Loveday B.K. (1966), "Analysis of froth flotation kinetics", Transactions of Australian immunology processing, 6, 2, p.p. 219-225.
- 75- Loveday B.K., Marchant G.R., (1972), "Simulation of Multicomponent flotation plants", Principal Scientist, Johannesburg, p.p. 325-330.
- 76- Ma G., Xia W., Xie G., (2018), "Effect of particle shape on the flotation kinetics of fine coking coal", Journal of Cleaner Production, 195, p.p. 470- 475.
- 77- Meyer W.C. and Klimpel R.R., (1984), "Rate limitations in froth flotation", Transactions of the Metallurgical Society of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 274, p.p. 1852-1858.
- 78- Mohammed A A., (2007), "Removal of Emulsified Paraffine from Water: Effect of Bubble Size and Particle Size on Kinetic Of Flotation", Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 3, p.p. 1-5.
- 79- Morris, T.M. (1951) Discussion of ref. [Flotation rates and flotation efficiency], Mineral engineering, 1, p.p. 991-992.
- 80- Morris T.M., (1952), "Measurement and evaluation of the rate of flotation as a function of particle size", Mineral engineering, 1, p.p. 794-798.
- 81- Myers RH, Montgomery DC., (1995) "Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiment", John Wiley and Sons.
- 82- Natarajan R., Nirdosh I., (2009), "Effect of molecular structure on the kinetics of flotation of a canadian nickel ore by N-arylhydroxamic acids", 93, p.p. 284-288.
- 83- Ni Ch., Bu X., Xia W., Peng Y., Xie G., (2018), "Effect of slimes on the flotation recovery and kinetics of coal particles", Fuel, 220, p.p. 159-166.
- 84- Niemi A. J., (1995), "Role of kinetics in modeling and control of flotation plants", Powder technology, 82, p.p. 69-77
- 85- Ofori P., O'Brien G., Hapugoda P., Firth B., (2014), "Distributed Flotation Kinetics Models – A new implementation approach for Coal Flotation", Minerals Engineering, 66-68, p.p. 77-83.

- 86- Oliveira J.F., Saraiva S.M., Pimenta J.S., Oliveira A.P.A., (2001), "Technical note kinetics of pyrochlore flotation from Araxa mineral deposit", *Mineral Engineering*, 1, p.p. 99-105
- 87- Polat M., Chander S., (2000), "First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constants", *International Journal of Mineral Processing*, 58, p.p. 145-166.
- 88- Radoev B., Alexandrova L., (1992), "Froth Flotation Kinetics-Theory and Model Experiments", *Flotation Technology*, p.p. 295-300.
- 89- Safari M., , Deglon D., (2018), "An attachment-detachment kinetic model for the effect of energy input on flotation", *Minerals Engineering*, 117, p.p. 8-13.
- 90- Saleh A m., (2010), "A Study On The Performance Of Second Order Models And Two Phase Models In Iron Ore Flotation", *Physicochemical problems in mineral processing*, 44, p.p. 215-230.
- 91- Schuhmann, R., (1942), "Flotation kinetics I - Methods for steady-state study of flotation problems", *Journal of physical chemistry*, 16, p.p. 891-902.
- 92- Sun W., Su J.F., Zhang G., Hu Y.H., (2012), "Separation of sulfide lead-zinc-silver ore under low alkalinity condition", *Journal of Central South University*, 19, p.p. 2307–2315.
- 93- Susko F.J., Stanley D.A., (1995), "A kinetics model for conventional flotation of coal", *United States department of the interior, USA*.
- 94- Sutherland. K.L., (1948), "Physical chemistry of flotation: Part 1/: Kinetics of the flotation process", *Journal of physical chemistry*, 51, p.p. 394-424.
- 95- Thompson P., (2002), "The Selection of Flotation Reagents via Batch Flotation Tests", *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control*, p.p. 136-144.
- 96- Vinnett L., Alvarez-Silva M., Jaques A., Hinojosa F., Yianatos J., (2015), "Batch flotation kinetics: Fractional calculus approach", *Mineral Engineering*, 77, p.p. 167-171.
- 97- Vinnett L., Navarra A., Waters K.E., (2019), "An inversion approach to characterize batch flotation kinetics", *Minerals Engineering*, 143, p.p. 67-75
- 98- Weiss N.L., (1985), "SME Mineral Processing Handbook", SME-AIME, New York.
- 99- Woodburn E., Loveday B., (1965), "The effect of variable residence time on the performance of a flotation system", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 65, p.p. 612-628.

- 100- Xu C.L. 1984, "Kinetic model for continuous flotation in a column", *Nonferrous metals, Transactions of Mineral processing*, 3, p.p. 35-42.
- 101- Xu M. (1997), "Modified flotation rate constant and selectivity index", *Mineral engineering*, 11, 3, p.p. 271-278.
- 102- Yalcin E., Kelebek S., (2011), "Flotation kinetics of a pyritic gold ore", *International Journal of Mineral Processing*", 98, p.p. 48-54.
- 103- Yianatos J., Bergh L., Contreras F., Diaz F., (2010), "Flotation rate distribution in the collection zone of industrial cells", *Mineral engineering*, 23 (11-13), p.p. 1030-1035.
- 104- Yin D. 1986, "Flotation model with a distribution of coefficient - the change of mean rate coefficient with time", *Nonferrous metals, Transactions of Mineral processing*, 38, p.p. 49-56
- 105- Yuan X.M., Palsson B.I., Forssberg K.S.E., (1996), "Statistical interpretation of flotation kinetics for a complex sulphide ore", *Mineral Engineering*, No. 4, p.p. 429-442.
- 106- Zhang J., (1989), "Factors affecting the kinetics of froth flotation", Ph.D thesis, Department of Mining and Mineral Engineering, University of Leeds
- 107- Zhang Z., Peng J., Srinivasakannan C., Zhang Z., Zhang L., Menéndez J.A., (2010), "Leaching zinc from spent catalyst: Process optimization using response surface methodology", *Journal of Hazardous Materials* 176, p.p. 1113–1117.
- 108- Zhang H., Liu J., Cao Y., Wang Y., (2013), "Effects of particle size on lignite reverse flotation kinetics in the presence of sodium chloride", *Powder Technology*, 246, p.p. 658-663.
- 109- Zhou Y., Albijanic B., Tadesse B., Wang Y., Yang J., Li G., Zhu X., (2019), "Surface hydrophobicity of sub-bituminous and meta-bituminous coal and their flotation kinetics", *Fuel*, 242, p.p. 416-424.
- 110- Zhou Y., Albijanic B., Tadesse B., Wang Y., Yang J., (2019), "Investigation of bubble–particle attachment interaction during flotation, *Minerals Engineering*, 133, p.p. 91-94.

Abstract

In this study, after sampling and preparation, preliminary studies were carried out on the sample. The results showed that the lead content in the sample was about 6.5%. Initially, flotation experiments were performed on the representative sample to determine the most effective parameters on flotation. In order to do this, the effect of frother dosage, sodium sulfide dosage, potassium amyl xanthate, sodium isobutyl xanthate and sodium isopropyl xanthate as collectors, collector dosage, grinding time, solid content, pH, aeration during conditioning, conditioning time, de-sliming, re-grinding, scavenger and adding collector in two steps, were investigated. The results of the initial experiments showed that pH, particle size, solid content, sodium sulfide dosage, collector dosage and collector type were the most effective parameters, so flotation kinetics tests were designed by these parameters and optimization was performed using response surface methodology based on central composite method. According to test results, the most suitable model and its parameters were selected from about 140 models. It should be noted that the frothing in flotation kinetics experiments was carried out automatically to increase the accuracy and uniformity of the flotation experiments. After the kinetics experiments, the results were compared between the laboratory results and the models. The results showed that among the models with unit kinetics constant, the overall equation was the best model. The flotation kinetics order was 1.87 which is referred to as pseudo-second order. A mathematical model was also proposed for the relation between the kinetic constant and the flotation order. The result showed that flotation order can obtain from kinetics constant as Logarithmic model ($n = -0.214 \ln(k) + 1.0343$). Finally, the results showed that during the flotation time, the kinetics constant decreases and the flotation order increases and the relationship between the flotation order and kinetics constant versus time and recovery is presented as a mathematical model. Also the result showed that flotation order was more sensitive on recovery than kinetics constant. Overall, the three-part flotation model (with seven parameters), with fast, medium, and slow kinetics constants, was most related to the experimental results ($R^2 > 0.99$). The relationship between model parameters and flotation operating parameters was investigated and introduced as a mathematical model. The presented models showed good correlation with the experimental data ($R^2 > 0.8$). The optimal conditions for cruciate flotation were as follows: pH = 9, d80 = 53 microns, solid content of 26%, sodium sulfide dosage 4000 g/t and 1500 g/t of PAX as a collector. By examining the effects of flotation parameters on model parameters, the results showed that the most effective parameter on k_1 is the particle size, the solid content have the least effect on k_2 . The most effective parameters on k_3 were pH and particle size and the most effective parameter on R_∞ are the sodium sulfide dosage and pH.

Key Words: Cerussite, Flotation order, Kinetics, Models classification, Optimization



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

Introducing a batch flotation kinetics model by the
change of effective parameters with an emphasis on
proposing a kinetic rate constant function

Maboud Asgari Mehrabadi

Supervisor:

Dr. Mohammad Karamoozian

Thesis for obtaining Ph.D in mineral processing

August 2019