

## مطالعه سینتیکی فلوتاسیون گیلسونیت‌های استان کرمانشاه

فاطمه کاظمی، عطااله بهرامی\*<sup>+</sup>، جعفر عبدالهی شریف

گروه مهندسی معدن، فرآوری مواد معدنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

**چکیده:** به منظور تعیین سینتیک فلوتاسیون و تأثیر اندازه ذره‌ها بر روی آن، آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی نمونه‌ای از گیلسونیت‌های استان کرمانشاه انجام شد. بدین منظور آزمایش‌های فلوتاسیون رافر و کلینر با کلکتور نفت. کف‌ساز MIBC، کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج و یک آزمایش نیز بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز انجام گرفت. در هر آزمایش کنسانتره‌های به دست آمده توزین و از آن‌ها آنالیز درصد خاکستر گرفته شد، همچنین همه کنسانتره‌های بازه‌های زمانی گوناگون دانه‌بندی شدند. سپس نمودارهای بازیابی - زمان مربوط به هر آزمایش رسم شد و با استفاده از مدل‌های گوناگون سینتیک مرتبه اول برازش داده شدند. نتیجه‌ها نشان‌دهنده تطابق بالای نتیجه‌های همه آزمایش‌ها با مدل کلاسیک مرتبه اول است. مقادیر ثابت سینتیک محاسبه شده با این مدل برای آزمایش‌های رافر، با کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC،  $0.0303$ ، کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج  $0.0301$  و بدون کلکتور و کف‌ساز  $0.161$  است. برای آزمایش‌های کلینر نیز مقدار  $k$  به ترتیب کلکتور و کف‌سازهای بالا  $0.168$ ،  $0.048$  و  $0.13$  محاسبه شد، در ادامه با توجه به مقدارهای  $k$  زمان ماند و حجم سلول فلوتاسیون به دست آمد. در این پژوهش، رابطه بین میزان ثابت فلوتاسیون، بیش‌ترین مقدار بازیابی و اندازه ذره‌ها هم مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که بیشینه مقدار بازیابی و ثابت فلوتاسیون در آزمایش‌های رافر متعلق به فلوتاسیون گیلسونیت بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز، با اندازه ذره‌های  $500 \mu m$ ،  $150$  - است، در آزمایش‌های کلینر نیز بیش‌ترین مقدار  $k$  و بازیابی متعلق به آزمایش کلینر با کلکتور گازوئیل و کف‌ساز روغن کاج با اندازه ذره‌های  $500 \mu m$ ،  $150$  - است.

**واژه‌های کلیدی:** سینتیک فلوتاسیون؛ مدل‌های سینتیکی مرتبه اول؛ گیلسونیت؛ کلکتور و کف‌ساز؛ دانه‌بندی.

**KEYWORDS:** Kinetic of flotation; First order kinetics models; Gilsonite, Collector & frother; Grading.

### مقدمه

مینرالیزاسیون پیچیده امکان‌پذیر شده است [۲]. عامل‌هایی مانند سینتیک و رفتار سینتیکی خوراک، نوع و چگونگی آماده‌سازی مواد شیمیایی، شدت جریان ماده با ارزش در خوراک، قابلیت شستشو، خاکستر و دانه‌بندی خوراک، میزان درگیر بودن کانی‌ها، نوع ماشین‌های فلوتاسیون و ... بر روی طراحی و سازمان‌دهی مدارهای فلوتاسیون تأثیر می‌گذارند [۳]. مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی و ارزیابی عملکرد مدارهای فلوتاسیون ارایه شده است

فرایند فلوتاسیون یکی از روش‌های بسیار کاربردی در صنعت فرآوری مواد معدنی (پریارسازی کانی‌ها) است. این روش در سال ۱۹۰۶ میلادی پایه‌گذاری شد و برای نخستین بار به صورت صنعتی در استرالیا و آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. فلوتاسیون یک روش کارآمد برای جدایش ذره‌های ماده معدنی از باطله همراه براساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سطوح مواد است [۱]. با استفاده از این روش بهره‌برداری از کانسارهای بزرگ با عیار کم و

\*عهده دار مکاتبات

+E-mail: a.bahrami@urmia.ac.ir

استاندارد برای بررسی رفتار سینتیکی ذره‌ها پیشنهاد کردند. این مدل شامل دو پارامتر بوده و یک رابطه مرتبه اول است. شکل ریاضی این مدل به صورت معادله (۲) است [۱۱]:

$$R_t = R_\infty (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $R_\infty$  بیش‌ترین مقدار بازیابی ممکن و  $t$  زمان است. برای محاسبه  $R_\infty$  باید منحنی تغییرهای  $R$  نسبت به زمان رسم شود. نقطه‌ای که منحنی به موازات محور زمان قرار گیرد بازیابی بیشینه ( $R_\infty$ ) را به دست می‌دهد. شیب منحنی خطی تغییرهای  $L_n (R_\infty / R_\infty - R)$  نسبت به زمان برابر  $k$  است.

سینتیک فلوتاسیون تأثیر تمامی عامل‌هایی که در طول عملیات فلوتاسیون به وقوع می‌پیوندند را در نظر می‌گیرد [۱۲]. مدل‌های سینتیکی می‌توانند برای تجزیه و تحلیل نتیجه‌های فلوتاسیون ناپیوسته مورد استفاده قرار گیرند. در میان تعداد زیادی مدل سینتیکی که برای فلوتاسیون ارائه شده است [۱۶ - ۱۳] مدل کلاسیک مرتبه اول به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است و می‌تواند برای طراحی مدارهای فلوتاسیون استفاده شود [۱۹ - ۱۷].

به منظور تعیین ثابت سینتیک فلوتاسیون و تأثیر آن در مدارهای فلوتاسیون تاکنون مطالعه‌های گوناگونی انجام شده است. درزیمالا<sup>(۷)</sup> و همکاران در پژوهشی براساس داده‌های گوناگون آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مواد گوناگون، به رسم نمودارهایی برای نمایش نتیجه‌های فرایند جدایش سینتیک پرداختند. نمودارهای جدایش به طور معمول به صورت دو بعدی با دو پارامتر بوده که یکی از آن‌ها، زمان فلوتاسیون است. براساس نتیجه‌های این پژوهش مقدار ثابت سینتیک با انتگرال‌گیری از معادله سینتیک مرتبه اول به دست آمد [۲۰]. حاجی‌زاده عمران و همکاران برای رفع مشکل‌های مدار فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی زرد که به دلیل تغییر در ویژگی‌های خوراک است، اقدام به مدل‌سازی مدارهای فلوتاسیون با توجه به مدل‌های سینتیکی با ثابت نرخ‌های توزیع شده براساس طبقه‌های ابعادی کردند. سرانجام نتیجه‌های اعتبارسنجی مدل، پارامترهای متالورژیکی کارخانه را با دقت بالایی (حد اطمینان ۹۵٪) پیش‌بینی کرد [۲۱]. اسکندری‌نسب و انتظار در سال ۱۳۹۱ طراحی مدارهای

که هر کدام جنبه‌های خاصی را ارائه می‌کنند و در حقیقت مکمل یکدیگر هستند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های سینتیکی اشاره کرد. فلوتاسیون و همچنین پدیده‌های سینتیکی و ترمودینامیکی آن فرایندهای تصادفی هستند. با توجه به تعداد ذره‌هایی که به طور پیوسته به سطح حباب متصل می‌شوند، نتیجه می‌شود که بازیابی این عملیات به زمان وابسته است. مطالعه سینتیکی فرایند فلوتاسیون شامل تعیین همه عامل‌هایی است که بر میزان کنسانتره تأثیر می‌گذارند. این میزان تولید کنسانتره را می‌توان به صورت‌های گوناگون تعریف کرد. اما در عملیاتی که بر روی سنگ معدن انجام می‌شود به طور عموم به صورت بازیابی بر حسب زمان تعریف می‌شود. اگر در شناورسازی ذره‌ها اغلب عامل‌ها ثابت نگه داشته شوند، مقدار ماده انتقال یافته به کنسانتره به صورت مستقیم تابع غلظت است [۴]:

$$\frac{dc}{dt} = -kc^n \quad (1)$$

در این معادله،  $c$  غلظت مواد باقی‌مانده در سلول فلوتاسیون،  $k$  ثابت سینتیک یا نرخ فلوتاسیون و  $n$  مرتبه واکنش. تلاش‌های زیادی برای توصیف توزیع نرخ فلوتاسیون انجام شده است. ایمازومی<sup>(۱)</sup> یک نرخ فلوتاسیون پیشنهاد داد که در آن توزیع نرخ فلوتاسیون پیوسته برای محاسبه مواد ناهمگنی است که شناور می‌شوند [۵]. لینچ<sup>(۲)</sup> در سال ۱۹۸۱ میلادی نشان داد که برخی از مدل‌ها به خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده نمی‌شوند، زیرا تعدادی از کانی‌ها به طور معمول سریع‌تر از کانی‌های دیگر شناور می‌شوند [۶]. گارسیا - زونیکا<sup>(۳)</sup> پارامترهای مدل خود را با استفاده از فناوری‌های گرافیکی تخمین زد [۷]. در سال ۱۹۶۱ میلادی کلسال<sup>(۴)</sup> نشان داد که معادله بازیابی فلوتاسیون برای یک کلاس ابعادی، تابع سرعت شناوری ذره‌ها است که به دو گروه ذره‌های با سرعت شناوری آهسته و شناوری سریع تقسیم می‌شوند [۸]. جووت<sup>(۵)</sup> و صفوی در سال ۱۹۶۲ میلادی یک جز سوم به مدل کلسال افزودند [۹]. ویلانیو<sup>(۶)</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۵ میلادی اصلاحات بیش‌تری بر روی مدل کلسال براساس استفاده از الگوی اختلاط کامل انجام دادند [۱۰]. پس از انجام پژوهش‌هایی از این دست، سرانجام پژوهشگران بسیاری مدل کلاسیک را به‌عنوان یک مدل

(۱) Imaizumi T. et al.

(۲) Lynch J. et al.

(۳) Garcia-Zuñiga

(۴) Kelsall

(۵) Jowett A. et al.

(۶) Villeneuve J. et al.

(۷) Drzymala et al.

قرار دارد. طبق بررسی‌های اولیه صورت گرفته در آزمایشگاه کان‌آرایی، مقدار خاکستر اولیه نمونه ۳۵ درصد اندازه‌گیری شد. همچنین براساس مطالعه‌های میکروسکوپی انجام شده بر روی نمونه گیلسونیت، مواد باطله به ترتیب فراوانی شامل ترکیب‌های کربناته (بیش‌تر از نوع کلسیت و دولومیت)، ترکیب‌های شیلی، مارن، ذره‌های ریز سولفات‌ها مثل ژیپس، ذره‌های ریز سیلیس و اوپک هستند. قطعه‌ها و ذره‌های باطله دارای ابعاد متغیر حدود چند میکرون تا سه میلیمتر بوده ولی بخش اعظم آن‌ها (حداقل ۷۰ درصد) بزرگ‌تر از ۱۵۰ میکرون است. توزیع قطعه‌های باطله از نظر اندازه‌ها و مقدار از نمونه‌ای به نمونه دیگر متفاوت است. در مجموع ترکیب‌های کربناته و شیلی، باطله اصلی نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد. برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون نمونه موجود با استفاده از سنگ‌شکن‌های فکی، غلتکی و آسیای گلوله‌ای به ذره‌های با اندازه کم‌تر از یک میلیمتر رسانده شد. نتیجه‌های مربوط به آنالیز سرنندی و میزان خاکستر هر فراکسیون در جدول ۱ آمده است.

### آزمایش‌های فلوتاسیون

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از نفت سفید و گازوئیل به‌عنوان کلکتور استفاده شد، MIBC (متیل ایزو بوتیل کربونیل) و روغن کاج به‌عنوان کف‌ساز، آب مورد استفاده برای انجام فلوتاسیون، آب لوله‌کشی دانشگاه ارومیه با دمای محیط بوده است. آزمایش‌های فلوتاسیون برای سه حالت فلوتاسیون با کلکتور نفت سفید - کف‌ساز MIBC، کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج و فلوتاسیون بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز انجام گرفته است. آزمایش‌های انجام گرفته برای هر کدام از این موردها، شامل دو قسمت فلوتاسیون رافر و کلینر است. در آزمایش‌های رافر یک پالپ با درصد جرمی ۱۰ درصد در سلول به مدت دو دقیقه با سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه مخلوط و سپس کلکتور در صورت استفاده (۱۷۵۰ g/t) میزان کلکتور براساس مطالعه‌های همانند صورت گرفته بر روی زغال‌سنگ) به پالپ افزوده شد و به مدت ۳۰ ثانیه به اختلاط ادامه داده شد. پس از این مرحله‌ها، هوا به داخل سلول دمیده و به مدت ۲۰۰ ثانیه عملیات کنسانتره‌گیری انجام گرفت.

فلوتاسیون زغال‌سنگ را براساس رفتار سینتیکی ذره‌ها انجام دادند. آن‌ها با توجه به تفاوت سرعت شناور شدن زغال‌سنگ‌های ناحیه کرمان، مدار فلوتاسیون را به دو بخش سینتیکی به طور کاملاً مجزا به‌صورت پرعیارکنی اولیه - رمق‌گیر و پرعیارکنی ثانویه - رمق‌گیر طراحی کردند [۲۲]. چو نی<sup>(۱)</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی به منظور بررسی تفاوت سینتیک فلوتاسیون در محدوده‌های ابعادی گوناگون دانه‌بندی زغال‌سنگ، فرایند شناورسازی را به‌عنوان تابعی از زمان در هر دو مرحله فلوتاسیون رافر و کلینر، انجام دادند. سپس داده‌های به دست آمده را با استفاده از نرم‌افزار MATRIX LABORATORY مدل‌سازی کردند. نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که در هر دو فرایند فلوتاسیون رافر و کلینر ذره‌های با اندازه متوسط دارای بیش‌ترین شناوری هستند [۲۳].

گیلسونیت<sup>(۲)</sup> یک هیدروکربن طبیعی است که با نام یوتاهینیت<sup>(۳)</sup> شناخته می‌شود. ماده‌ای شکننده، براق و از نوع بیتومین‌های آسفالتیت است. سنگ معدن آن به رنگ سیاه ولی پودر آن قهوه‌ای تیره است [۲۴]. ذخیره‌های قیر طبیعی (گیلسونیت) در کشورهای آمریکا، کانادا، ایران، ونزوئلا، روسیه، استرالیا و عراق قرار دارند. ایران با دارا بودن ۱۵ درصد گیلسونیت جهان، سومین کشور دارنده این ذخایر معدنی است. ذخیره‌های گیلسونیت ایران به طور عمده در استان‌های کرمانشاه (۷۵ درصد کل ذخیره ایران)، ایلام، خوزستان و غرب استان لرستان واقع شده‌اند [۲۵]. این پژوهش به منظور تعیین ثابت سینتیک فلوتاسیون گیلسونیت و محدوده ابعادی شناوری ذره‌های آن، بر روی نمونه‌ای از گیلسونیت مربوط به معدن گراوه شهرستان قصرشیرین استان کرمانشاه انجام گرفته است. بدین منظور، آزمایش‌های فلوتاسیون در دو مرحله فلوتاسیون رافر<sup>(۴)</sup> و کلینر<sup>(۵)</sup> با کلکتور و کف‌سازهای گوناگون انجام گرفت. پس از آن داده‌های به دست آمده با استفاده از رابطه‌های گوناگون سینتیک برازش و مناسب‌ترین مدل مشخص شد. سپس مقدار ثابت سینتیک با توجه به مدل انتخابی محاسبه شد.

### بخش تجربی

#### مواد

نمونه مورد آزمایش در این مطالعه مربوط به معدن گراوه شهرستان قصرشیرین است، که در ۱۶۶ کیلومتری غرب شهرستان کرمانشاه

(۱) Chao Ni et al.

(۲) Gilsonite

(۳) Utahinite

(۵) Rougher

(۶) Cleaner

جدول ۱- توزیع دانه بندی و خاکستر نمونه گیلسونیت.

مقدار خاکستر %	جرم %	فراکسیون دانه بندی (um)
-	۷,۲۶	۸۵۰-۵۰۰
۳۴,۲	۳۰,۳	۵۰۰-۲۵۰
۲۵,۸	۱۸,۷۵	۲۵۰-۱۰۶
۲۲,۲	۱۳,۱	۱۰۶-۷۵
۲۶,۸	۲۸,۹۶	-۷۵

## ۲. مدل اختلاط کامل

$$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \left( \frac{1}{1 + \frac{t}{k}} \right) \right\} \quad (۵)$$

## نتیجه‌ها و بحث

## تعیین مقدار ثابت سینتیک فرایندهای فلوئاسیون رافر و کلینر

نمودارهای بازیابی - زمان برای فرایند فلوئاسیون رافر با استفاده از کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC، کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج و حالت بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود در همه حالت‌های آزمایش، مدل سینتیکی مرتبه اول کلاسیک دارای بیش‌ترین انطباق با نتیجه‌های آزمایشگاهی است.

مشابه حالت قبل، نمودارهای بازیابی - زمان فرایند فلوئاسیون کلینر در شکل ۲ آمده است. در حقیقت، فرایند فلوئاسیون چند مرحله‌ای در مورد گیلسونیت باعث کاهش مقدار خاکستر به‌وسیله حذف حباب‌های هیدرولیک و نپذیرفتن انتخابی ذره‌های هیدروفوبیک پایین‌تر می‌شود. بنابراین در این مطالعه به سینتیک فرایند فلوئاسیون چند مرحله‌ای نیز پرداخته شده است. در این نمودارها نیز داده‌ها دارای بیش‌ترین تطابق با مدل کلاسیک مرتبه اول هستند.

با توجه به تطابق داده‌های آزمایشگاهی سینتیک فلوئاسیون گیلسونیت با مدل کلاسیک مرتبه اول، ثابت فلوئاسیون با استفاده از این مدل، و از طریق رسم گراف‌های  $L_n(R_{inf}/R_{inf} - R)$  نسبت به زمان محاسبه شد. نمودارهای شکل ۳ تغییرهای  $L_n(R_{inf}/R_{inf} - R)$  را نسبت به زمان نشان می‌دهند. شیب این نمودارها بیانگر مقدار ثابت فلوئاسیون در زمان‌های گوناگون است.

خوراک آزمایش‌های کلینر کنسانتره‌ی به‌دست آمده از فلوئاسیون رافر است. پارامترهای عملیاتی در آزمایش کلینر همانند آزمایش رافر هستند. در فلوئاسیون کلینر، کنسانتره آزمایش رافر به‌عنوان خوراک در داخل سلول ریخته و به مدت یک دقیقه با سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه مخلوط شد (هیچ معرف فلوئاسیونی در این مرحله به پالپ افزوده نمی‌شود). به منظور به حجم رساندن سلول به آن آب افزوده شد و پس از آن با دمیدن هوا به درون سلول کنسانتره‌گیری انجام گرفت. فرآورده‌های پایانی همه آزمایش‌های فلوئاسیون رافر و کلینر براساس مدت کنسانتره‌گیری به شش فرآورده (به‌همراه باطله فلوئاسیون) زیر تقسیم‌بندی شدند: (ثانیه) ۲۰۰ - ۱۲۰، ۱۲۰ - ۸۰، ۸۰ - ۶۰، ۶۰ - ۴۰، ۴۰ - ۲۰، ۲۰ - ۰

همه فرآورده‌ها شامل کنسانتره‌ها و باطله‌ها، صاف و خشک شده؛ سپس وزن شدند و آنالیز درصد خاکستر بر روی آن‌ها انجام گرفت. افزون بر این، فرآورده‌ها با چهار سرنده به اندازه‌های ۵۰۰، ۲۵۰، ۱۰۶، ۷۵ میکرون دانه‌بندی شدند. پس از به‌دست آمدن مقدار خاکستر بازیابی فلوئاسیون از معادله (۳) محاسبه شد:

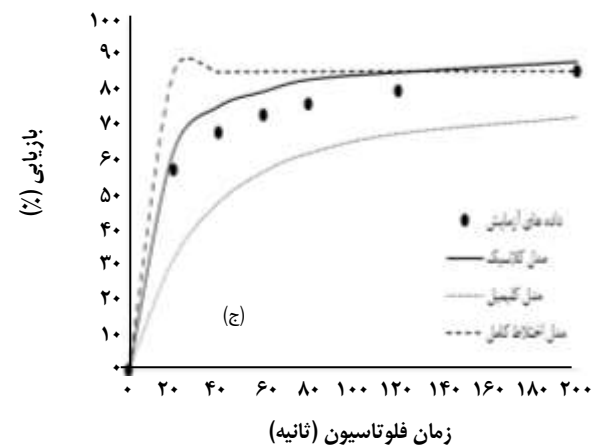
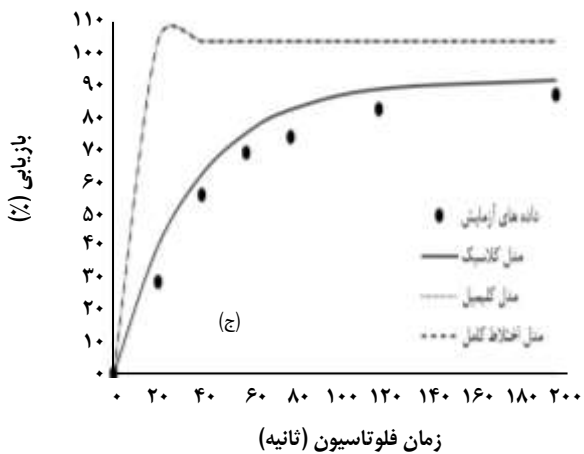
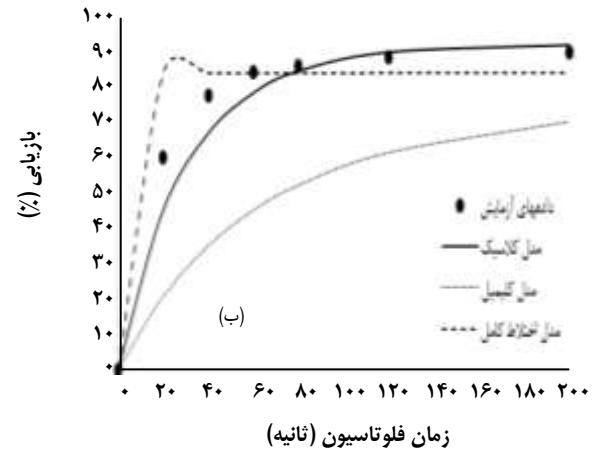
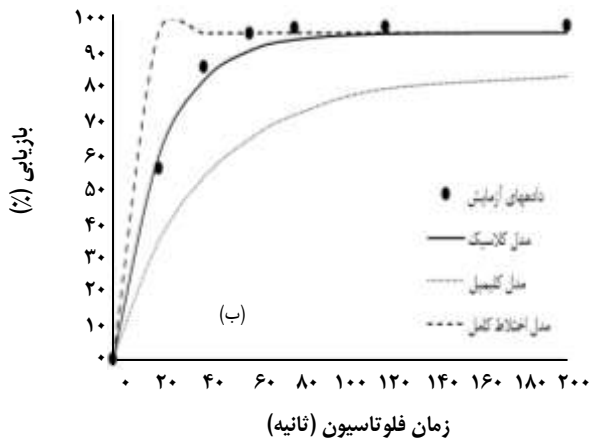
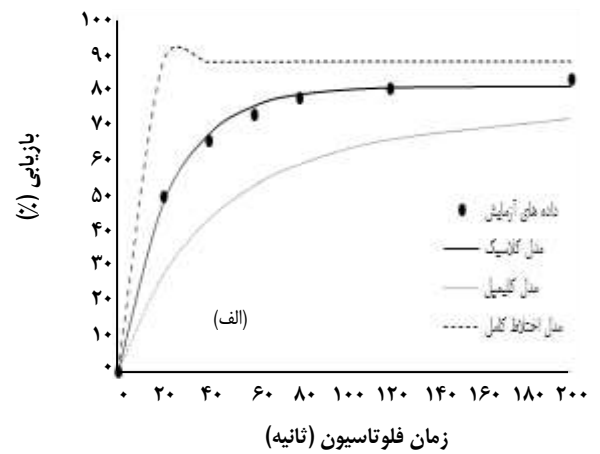
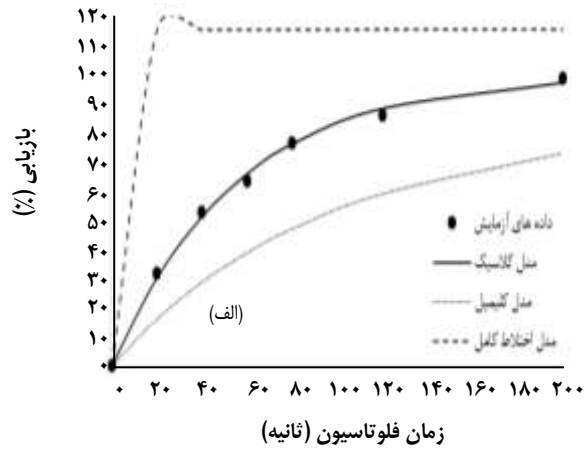
$$\%R = \frac{W_c(100 - A_c)}{W_f(100 - A_f)} \quad (۳)$$

که در آن  $W_c$  وزن کنسانتره،  $A_c$  درصد خاکستر کنسانتره و همچنین  $W_f$  و  $A_f$  مربوط به خوراک است. پس از انجام آزمایش‌های سینتیک و رسم منحنی‌های بازیابی - زمان، این منحنی‌ها با مدل کلاسیک مرتبه اول (معادله (۲)) و دو مدل سینتیکی زیر برازش داده شدند.

۱. مدل فلوئاسیون با توزیع مستطیلی (مدل کلیمپل<sup>(۱)</sup>)

$$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \frac{1}{kt} (1 - \exp(-kt)) \right\} \quad (۴)$$

(۱) klimpel

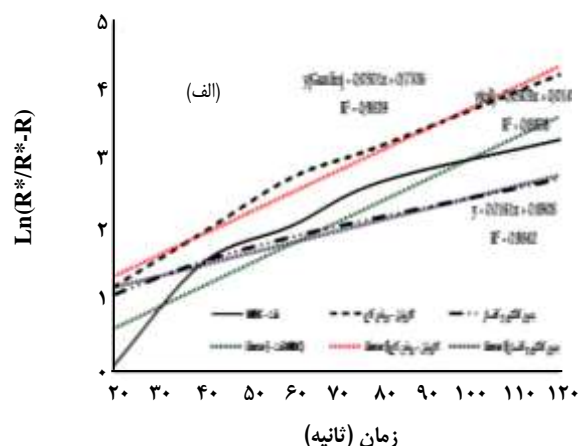
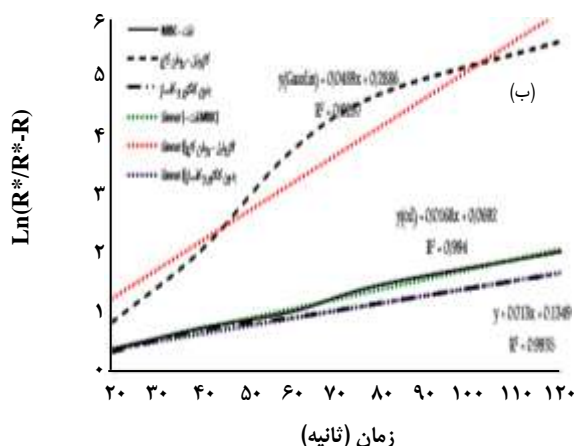


شکل ۲- برازش مدل‌های سینتیکی مرتبه اول برای آزمایش‌های فلوتاسیون کلینر الف) کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC ب) کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج ج) فلوتاسیون بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز.

شکل ۱- برازش مدل‌های سینتیکی مرتبه اول برای آزمایش‌های فلوتاسیون رافر الف) کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC ب) کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج ج) فلوتاسیون بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز.

جدول ۲- زمان ماند و حجم سلول فلوتاسیون آزمایش‌های رافر و کلینر.

آزمایش	آزمایش‌های رافر		آزمایش‌های کلینر	
	زمان ماند (s)	حجم سلول (m <sup>3</sup> )	زمان ماند (s)	حجم سلول (m <sup>3</sup> )
کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC	۲۰	۶٫۶	۳۸	۱۲٫۵۴
کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج	۵	۱٫۶۵	۱۵	۴٫۹۵
بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز	۹	۲٫۹۷	۴۳	۱۴٫۱۹



شکل ۳- تعیین ثابت فلوتاسیون (سینتیک) نمونه گیلسونیت. الف) آزمایش‌های رافر، ب) آزمایش‌های کلینر.

در آزمایش‌های کلینر انجام گرفته به ترتیب آورده شده در بالا ۹۸٫۱۲، ۹۵٫۵۶ و ۸۹٫۲۵ درصد محاسبه شد.

**محاسبه زمان ماند و ظرفیت سلول فلوتاسیون:**

یکی از کاربردهای سینتیک، محاسبه زمان ماند و حجم سلول فلوتاسیون با توجه به زمان است. در این پژوهش با رسم گراف‌های  $\frac{\ln(R_{inf}/R_{inf}-R)}{t}$  بر حسب  $t$  زمان بهینه هر یک از آزمایش‌های فلوتاسیون محاسبه شد. سپس با توجه به زمان ماند، حجم سلول با استفاده از معادله (۶) برای خوراک ورودی با شدت جریان ۱ تن در ساعت تخمین زده شد (جدول ۲).

$$V = \frac{1}{\epsilon} \cdot QTEP \quad (۶)$$

در معادله (۶)،  $V$  حجم سلول،  $Q$  شدت جریان خوراک تن در ساعت،  $T$  زمان ماند،  $E$  ضریب هوادهی که به طور معمول مقدار آن را ۱٫۸۵ در نظر می‌گیرند و  $P$  حجم پالپ به ازای یک تن بار ورودی خشک که با استفاده از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

در آزمایش فلوتاسیون رافر با کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC، با در نظر گرفتن مقدار ثابت سینتیک  $۰٫۰۳۰۳$  و زمان ماند ۲۰۰ ثانیه در داخل سلول فلوتاسیون، مقدار بازیابی ۸۰٫۸۹ درصد خواهد بود. این مقدار برای آزمایش رافر با کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج و رافر بدون کلکتور و کف‌ساز در همان مدت زمان با ثابت‌های سینتیک به ترتیب  $۰٫۰۳۰۱$  و  $۰٫۰۱۶۱$ ، نیز ۸۸٫۹ و ۸۷٫۵۲ درصد است. لازم به ذکر است که در حالت فلوتاسیون بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز میزان خاکستر ۲۶٫۴۱ درصد است و در حالت استفاده از کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC و کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج در شرایط همانند به ترتیب ۲۴٫۵۶ و ۲۳٫۱ درصد است که نسبت به آزمایش بدون کلکتور و کف‌ساز کاهش داشته است. بنابراین برای به‌دست آوردن بازیابی مناسب و فراورده‌ی پرعیارتر، فلوتاسیون گیلسونیت با استفاده از کلکتور و کف‌ساز پیشنهاد می‌شود. ثابت سینتیک فرایندهای فلوتاسیون کلینر در آزمایش‌های با کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC، کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج و آزمایش بدون کلکتور و کف‌ساز به ترتیب  $۰٫۰۱۶۸$ ،  $۰٫۰۴۸۹$  و  $۰٫۰۱۳$  محاسبه شد. بیشینه مقدار بازیابی نیز



$$P = \frac{1}{d_s} + \frac{100}{s} - 1 \quad (7)$$

$d_s$  جرم مخصوص جامد، S درصد جامد.

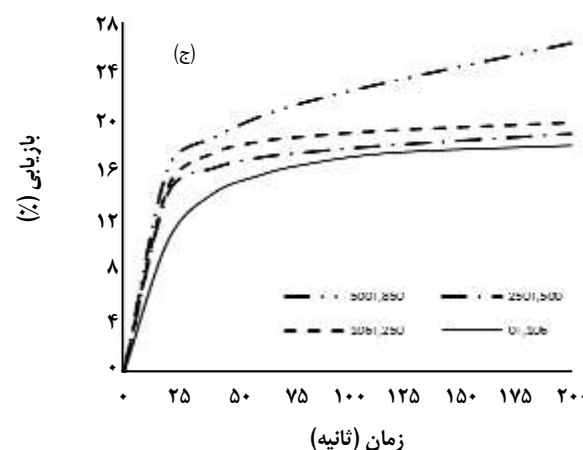
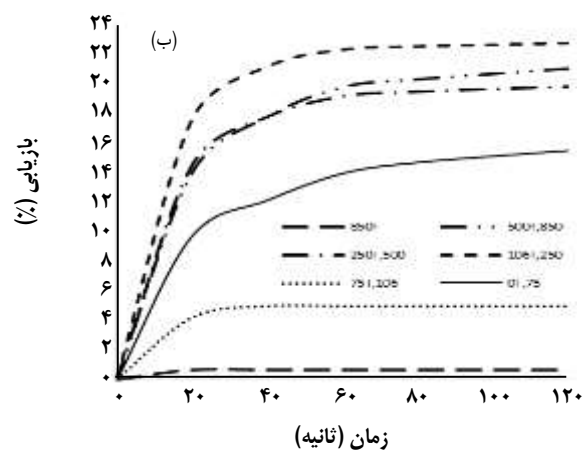
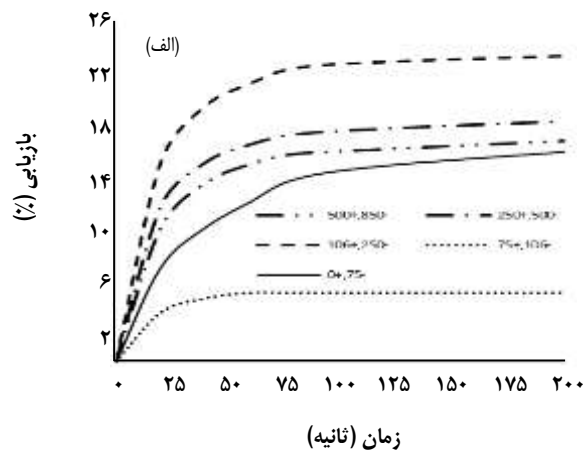
### تأثیر اندازه ذره‌ها بر بازیابی و ثابت k در آزمایش‌های فلوتاسیون رافر

فلوتاسیون یک فرایند جدایش فیزیکی - شیمیایی است که در آن ذره‌های هیدروفوب به وسیله حباب هوا و کف به سطح پالپ آورده می‌شوند. این فرایند در سه مرحله شامل برخورد ذره‌ها - حباب، اتصال و قطع اتصال انجام می‌شود [۲۶]. روشن است که اندازه ذره‌ها مهم‌ترین عامل در فرایند فلوتاسیون بوده و کارایی فرایند فلوتاسیون به آن وابسته است [۲۷].

در شکل ۴ بازیابی فلوتاسیون براساس زمان برای محدوده‌های دانه‌بندی گوناگون و با استفاده از کلکتورها و کف‌سازهای متفاوت در فرایند فلوتاسیون رافر آمده است. در تمامی آزمایش‌های رافر انجام گرفته، بازیابی ابتدا افزایش و پس از آن به سمت یک مقدار ثابت میل کرده است. در آزمایش‌های رافر انجام گرفته با کلکتور و کف‌ساز، بیش‌ترین مقدار بازیابی مربوط به محدوده ابعادی  $106\mu\text{m}$ ،  $75\mu\text{m}$  و  $50\mu\text{m}$  -  $25\mu\text{m}$  و در حالت بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز بیش‌ترین بازیابی، مربوط به محدوده ابعادی ذره‌ها  $500\mu\text{m}$ ،  $850\mu\text{m}$  - است. یعنی در صورت استفاده از معرف‌های فلوتاسیون بیشینه بازیابی در فرایند رافر مربوط به ذره‌ها با اندازه متوسط است. همانند این حالت در پژوهش‌های انجام گرفته بر روی نمونه‌های زغال‌سنگ گزارش شده است.

### تأثیر اندازه ذره‌ها بر بازیابی و ثابت k در آزمایش‌های فلوتاسیون کلینر

نمودارهای بازیابی - زمان برای محدوده‌های ابعادی گوناگون فلوتاسیون کلینر در شکل ۵ آمده است. در این حالت نیز بازیابی ابتدا افزایش و پس از آن به تقریب ثابت شده است. در آزمایش‌های کلینر، بیشینه بازیابی در محدوده‌های دانه‌بندی گوناگون دانه‌بندی با توجه به نوع کلکتور و کف‌ساز مورد استفاده، متفاوت است. در مورد کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC، بیشینه بازیابی مربوط به ذره‌ها با اندازه متوسط یعنی  $106\mu\text{m}$ ،  $75\mu\text{m}$  -  $25\mu\text{m}$  است. در مورد کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج بیشینه بازیابی با افزایش اندازه ذره‌ها افزایش پیدا کرده است و بیش‌ترین بازیابی مربوط به محدوده  $500\mu\text{m}$ ،  $850\mu\text{m}$  - است. در حالت بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز نیز، بیش‌ترین بازیابی مربوط به ذره‌های

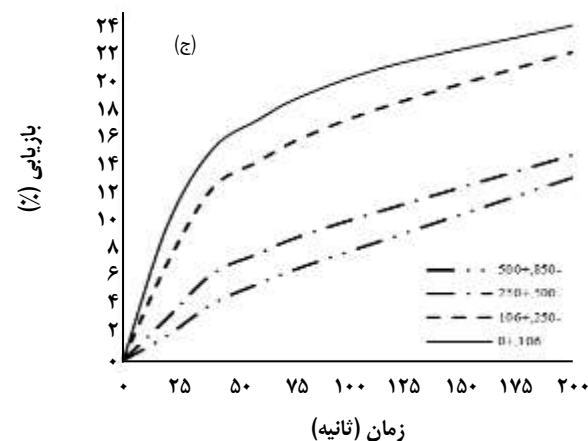
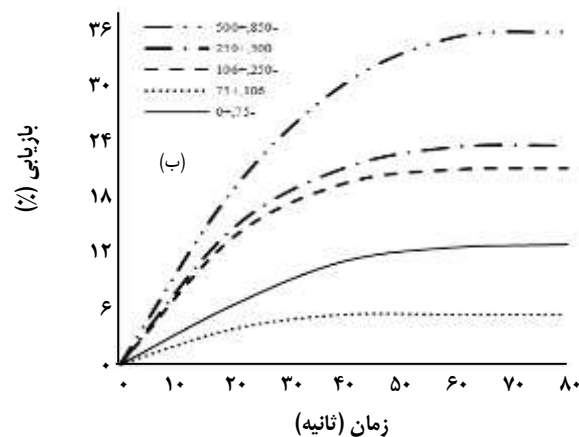
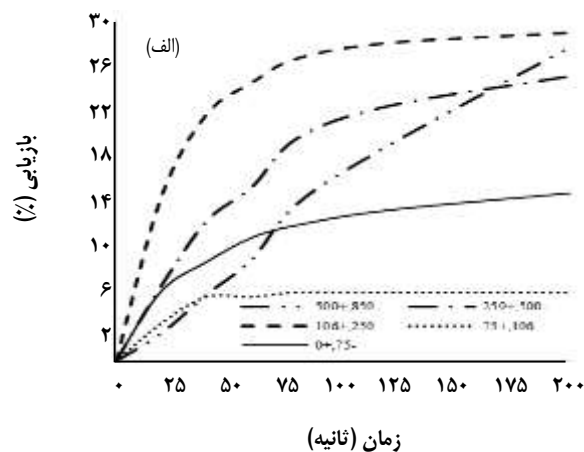


شکل ۴- نمودارهای بازیابی - زمان در فراکسیون‌های دانه‌بندی گوناگون آزمایش‌های رافر الف) کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC ب) کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج ج) بدون کلکتور و کف‌ساز.

با اندازه  $\mu\text{m}$  ۰، ۱۰۶- بوده و با افزایش اندازه بازیابی کاهش یافته است.

### نتیجه گیری

در این پژوهش ثابت فلوتاسیون و تفاوت در نرخ شناوری ذره‌های گیلسونیت در محدوده‌های گوناگون ابعادی، با آزمایش‌های فلوتاسیون رافر و کلینر با استفاده از معرف‌های گوناگون فلوتاسیون مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور با رسم نمودارهای بازیابی - زمان به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و برآزش آن‌ها با مدل‌های سینتیکی مرتبه اول کلاسیک، کلیمپل و اختلاط کامل دیده شد، که نتیجه‌های تمامی آزمایش‌ها دارای انطباق بالایی با مدل کلاسیک هستند. مقدار بهینه ثابت فلوتاسیون مربوط به فرایند فلوتاسیون رافر با کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC به مقدار  $0.301$  با ضریب همبستگی  $0.98$  و در آزمایش‌های کلینر نیز مربوط به فرایند فلوتاسیون کلینر با کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج با مقدار ثابت فلوتاسیون  $0.48$  و ضریب همبستگی  $0.92$  است. با توجه به مقدارهای به‌دست آمده برای ثابت فلوتاسیون، زمان ماند و حجم سلول فلوتاسیون برای خوراک با شدت جریان ۱ تن در ساعت، در هر یک آزمایش‌ها محاسبه شد. بهینه‌ترین حجم سلول و زمان ماند در آزمایش‌های رافر و کلینر متعلق به آزمایش با کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج است. همچنین رابطه بین میزان ثابت فلوتاسیون، بیش‌ترین مقدار بازیابی و اندازه ذره‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. در فرایند فلوتاسیون رافر، بیشینه بازیابی و نرخ شناوری در ذره‌ها با اندازه متوسط و استفاده از کلکتور و کف‌ساز به‌دست آمده است. افزون بر این، بازیابی و نرخ شناوری محدوده‌های ابعادی گوناگون در فرایند کلینر بهبود یافته است. بیشینه مقدار بازیابی در آزمایش‌های رافر مربوط به آزمایش بدون استفاده از کلکتور و کف‌ساز با اندازه ذره‌های  $500$ ،  $850$  -  $\mu\text{m}$  و بیشینه بازیابی فلوتاسیون کلینر با کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج در محدوده‌های ابعادی  $500$ ،  $850$  -  $\mu\text{m}$  است.



شکل ۵ - نمودارهای بازیابی - زمان در فراکسیون‌های دانه‌بندی گوناگون آزمایش‌های کلینر الف) کلکتور نفت - کف‌ساز MIBC ب) کلکتور گازوئیل - کف‌ساز روغن کاج ج) بدون کلکتور و کف‌ساز.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷ / تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷



## مراجع

- [1] Ehsani M.R., Eghbali F., [Reduction of Sulfur and Ash from Tabas Coal by Froth Flotation](#), *Iranian Journal of Chemistry & Chemistry Engineering (IJCCE)*, **26**(2): 35-40 (2007).
- [۲] احمدی، رحمان؛ خدادادی دربان، احمد؛ عبداللهی، محمود؛ فلوتاسیون نرمه‌های کالکوپیریت در حضور نانوحباب‌های تولید شده با روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۴) ۳۲: ۸۱ تا ۹۱، (۱۳۹۲).
- [3] Shahbazi B., Rezai B., Koleini S.M.J., Noparast M., [The Effect of Bubble Surface Area Flux on Flotation Efficiency of Pyrite Particles](#), *Iranian Journal of Chemistry & Chemistry Engineering (IJCCE)*, **32**(2): 109-118 (2013).
- [4] Shahbazi B., Rezai B., [The Effect of Micro Turbulence on Quartz Flotation Rate](#), *Iranian Journal of Chemistry & Chemistry Engineering (IJCCE)*, **34**(3): 79-89 (2015).
- [5] Imaizumi T., Inoue T., “[Kinetic Considerations of Froth Flotation](#)”, *6th International Mineral Processing Congress*, Cannes, pp: 581-593(1963).
- [6] Lynch A.J., Johnson N.W., Manlapig E.V., Thorne C.G., “[Mineral and Coal Flotation Circuits, Their Simulation and Control](#)”, Elsevier Scientific Publishing Company (1981).
- [7] Garcia-Zuñiga H., “[Flotation Recovery is an Exponential Function of Time](#)”, *Boletin Minero de la Societal National de Minero*, Santiago, Chile (1935).
- [8] Kelsall D.F., [Application of Probability in the Assessment of Flotation Systems](#), *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, **70**: 191-204 (1961).
- [9] Jowett A., Safvi S.M.M., [Refinements in Methods of Determining Flotation Rates](#), *AIME*, **217**: 351-357 (1960).
- [10] Villeneuve J., Guillaneau J.C., and Durance M.V., [Flotation Modelling: A Wide Range of Solutions for Solving Industrial Problems](#), *Minerals Engineering*, **8**: 409-420 (1995).
- [11] Gupta A. Yan D.S., “[Mineral Processing Design an Operation: An Introduction](#)”, Elsevier (2006).
- [12] Lazic P., Calic N., Boltzmann S., “[Model of Flotation Kinetics](#)”, In: *Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress*, pp: 87-93 (2000).
- [13] Bogdanov O.S., Hainman V.J., Maximov I.I., “[On Certain Physical-Mechanical Factors Determining the Rate of Flotation](#)”, *Proc. VII IMPC*, New York, Gordon & Breach, pp:169-174 (1964).
- [14] Laskowski J.S., Xu Z., Yoon R.H., [Energy Barrier in Particle-to-Bubble Attachment and Its Effect on Flotation Kinetics](#), *Proc. XVII IMPC*, **2**: 237-249 (1991).
- [15] Lazic P., Calic N., “[Boltzmann's Model of Flotation Kinetics](#)”, *Proc. XXI IMPC (Rome)*, B, pp: 87-93 (2000).
- [16] Husyin V., Oktay B., Metin U., [Coal Flotation Optimization Using Modified Flotation Parameters and Combustible Recovery in a Jameson Cell](#), *Energy Conversion and Management*, **51**: 1891-1897 (2010).

- [17] Xu M., **Modified Flotation Rate Constant and Selectivity Index**, *Mineral Engineering*, **11**: 271-278 (1998).
- [18] Agar G.E., Chia J., Requisc, L., **Flotation Rate Measurements to Optimize an Operating Circuits**, *Mineral Engineering*, **11**: 347-360 (1998).
- [19] Oliveira J.F., Saraiva S.M., Pimenta J.S., Oliveira A.P.A., **Kinetics of Pyrochlore Flotation from Araxes Mineral Deposits**, *Mineral Engineering*, **14**: 99-105 (2001).
- [20] Drzymala J., Ratajczak T., Kowalczyk P., **Kinetic Separation Curves Based on Process Rate Considerations**, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, **53**(2): 983-995 (2017).
- [۲۱] حاجی‌زاده عمران، امیر؛ پارساپور، غلامعباس؛ بنیسی، صمد؛ "مدلسازی مدارهای فلوتاسیون زغال‌سنگ، مطالعه موردی: کارخانه زغالشویی زرنده"، *اولین کنگره ملی زغال‌سنگ*، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۹۱).
- [۲۲] اسکندری نسب، محمود؛ انتظاری، علی؛ "طراحی مدارهای فلوتاسیون زغال‌سنگ بر اساس رفتار سینتیکی ذرات"، *اولین کنگره ملی زغال‌سنگ*، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۹۱).
- [23] Ni Ch., Xie G., Jin M., Peng Y., Xia W., **The Difference in Flotation Kinetics of Various Size Fractions of Bituminous Coal between Rougher and Cleaner Flotation Processes**, *Powder Technology*, **292**: 210-216(2016).
- [24] Carr Donald D., **"Industrial mineral and Rocks"**, Six ed. Vo11, Senior Editor, pp: 535-543 (1994).
- [۲۵] "گزارش اکتشافی قیر طبیعی در منطقه گیلانغرب"، سازمان صنعت، معدن و تجارت استان کرمانشاه (۱۳۹۴).
- [26] Muganda S., Zanin M., Grano S.R., **Benchmarking Flotation Performance: Single Minerals**, *Int. J. Miner. Process.*, **98**(3-4): 182-194 (2011).
- [27] Zhang H., Liu J., Cao Y., Wang Y., **Effects of Particle Size on Lignite Reverse Flotation Kinetics in the Presence of Sodium Chloride**, *Powder Technol*, **246**:658-663 (2013).