

صلى الله عليه وسلم



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

**بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر بهبود بازیابی فلوتاسیون و کاهش مصرف**

**مواد شیمیایی**

نگارنده:

عبدالرحیم دوستی مژن آبادی

استاد راهنما:

دکتر محمد کارآموزیان

شهریور ۱۳۹۷

## تقدیم به:

اول، سپاس خدای بی‌کران خدای را، که اول و آخر وجود است، بی‌آنکه اولی بر او پیشی گیرد یا آخری پس از او باشد.

دوم، سپاس بی‌کران خدای را که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

حال این برگ سبزیست تحفه درویش، تقدیم به

**پدر و مادر عزیز و فداکارم**

## سپاسگزاری:

نخستین سپاس از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از وسعت دریچه اندیشه‌های ناب اساتید بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده‌نوازی‌هایش پایان‌نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به‌جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایان‌نامه به اتمام نمی‌رسید.

از زحمات استاد گران‌قدرم دکتر محمد کارآموزیان که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند صمیمانه سپاسگزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم. همچنین از زحمات جناب آقای مهندس قنبری و مهندس محمد جعفری به خاطر همکاری بی‌دریغشان همچون دوست خویم آقای امیر عیوض خانی در این عرصه صمیمانه سپاسگذارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

از جناب آقای دکتر اصغر عزیزی و دکتر محمد جهانی چگنی که زحمت داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و همچنین جناب آقای دکتر کیومرث سیف پناهی شعبانی، نماینده تحصیلات تکمیلی، صمیمانه کمال تشکر را دارم.

سپاس آخر را از مهربان‌ترین همراهان زندگی‌ام، پدر و مادرم دارم که حضورشان در فضای زندگی‌ام مصداق بی‌ریای سخاوت بوده است.

## تعهدنامه

اینجانب عبدالرحیم دوستی مژن آبادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر بهبود بازیابی فلوتاسیون و کاهش مصرف مواد شیمیایی تحت راهنمایی دکتر محمد کارآموزیان متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می‌باشد و مقالات مستخرج بانام دانشگاه صنعتی شاهرود و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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:

امضاء دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

فلوتاسیون یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های آرایش مواد معدنی است که بر مبنای خواص شیمی فیزیکی سطح جامدات برای ذرات ۲۰ تا ۲۰۰ میکرون در یک محیط سیال و جریان هوا برای ایجاد حباب‌های مناسب بنا شده است. به‌رغم پیشرفت‌های زیادی که در زمینه فرآوری کانی‌های با ارزش صورت گرفته است، در حال حاضر نیز فلوتاسیون به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در تهیه کنسانتره اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. فلوتاسیون به‌طور معمول در حضور کلکتور و کف‌ساز انجام می‌شود. در فلوتاسیون زغال‌سنگ برای بهبود بازیابی ذرات زغال‌سنگ از کلکتورهای نفتی استفاده می‌کنند. با توجه به هزینه بالای معرف‌های شیمیایی اگر امکان حذف یا مصرف کمتر آن‌ها در هزینه‌های فلوتاسیون وجود داشته باشد، هزینه‌های عملیاتی کاهش خواهد یافت. در این پایان‌نامه بیشتر تمرکز بر روی بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر رفتار فلوتاسیون زغال‌سنگ قرار گرفته است. با توجه به مطالعات اخیر در زمینه تأثیر نمک‌های معدنی بر فلوتاسیون کانی‌های مختلف، تأثیر نمک‌ها و برهم‌کنش نمک‌ها (دو نوع نمک) بر فلوتاسیون زغال‌سنگ باهدف بهبود بازیابی زغال‌سنگ و کاهش مصرف مواد شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این سینتیک فلوتاسیون زغال‌سنگ در حضور محلول نمکی مختلف انجام شد و با فلوتاسیون معمولی مقایسه شد. نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها نشان داد که حضور نمک‌های معدنی باعث افزایش راندمان فلوتاسیون زغال‌سنگ و کاهش مصرف مواد شیمیایی می‌شود و نمک‌های نیترا ته بیشترین بازیابی ۹۴٪، نمک‌های کلرید بازیابی متوسط ۸۴-۹۳٪ و استات سدیم کمترین مقدار بازیابی ۴۴٪ را نشان دادند. همچنین نمک‌های نیترا ته و کلرید از همبستگی حباب‌ها جلوگیری می‌کند ولی نمک استات سدیم تأثیر بر جلوگیری از همبستگی حباب‌ها ندارد. سینتیک فلوتاسیون زغال‌سنگ در حضور محلول نمکی بیشتر از فلوتاسیون معمولی است.

**کلمات کلیدی:** فلوتاسیون، زغال‌سنگ، نمک‌های معدنی، سینتیک

مقالات مستخرج از پایان‌نامه:

- دوستی ر، کارآموزیان م، (۱۳۹۷) " تأثیر کلرید پتاسیم بر فلوتاسیون زغال‌سنگ البرز شرقی "، چهارمین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران، ص ۵۶، شرکت زغال‌سنگ پروده طبس

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات .....
۲	۱-۱ مقدمه .....
۳	۱-۱-۱ فلوتاسیون .....
۳	۱-۱-۱-۱ تاریخچه فلوتاسیون .....
۴	۱-۱-۱-۲ تئوری فلوتاسیون .....
۵	۱-۱-۱-۳ کاربرد فلوتاسیون .....
۶	۲-۱-۱ نمک‌های معدنی .....
۷	۳-۱-۱ فلوتاسیون زغال سنگ .....
۱۲	۲-۱ بیان مسئله .....
۱۳	۳-۱ ضرورت تحقیق .....
۱۳	۴-۱ اهداف تحقیق .....
۱۴	۵-۱ ساختار پایان نامه .....
۱۵	فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته .....
۱۶	۱-۲ مقدمه .....
۱۶	۲-۲ تأثیر نمک‌های معدنی بر فلوتاسیون زغال سنگ .....
۲۳	۳-۲ جمع بندی .....
۲۵	فصل سوم: مواد و روش‌ها .....



۲۶	..... ۱-۳ مقدمه
۲۶	..... ۲-۳ مواد و تجهیزات
۲۶	..... ۱-۲-۳ مواد شیمیایی استفاده شده
۲۶	..... ۲-۲-۳ تجهیزات مورد استفاده قرار گرفته
۲۷	..... ۳-۳ روش‌ها
۲۷	..... ۱-۳-۳ تهیه و آماده سازی نمونه
۲۷	..... ۲-۳-۳ تعیین درصد خاکستر
۲۸	..... ۱-۲-۳-۳ آنالیز خوراک اولیه فلوتاسیون
۲۹	..... ۳-۳-۳ انتخاب پارامترهای مورد بررسی
۳۰	..... ۴-۳-۳ آزمایش‌های فلوتاسیون
۳۰	..... ۵-۳-۳ سینتیک فلوتاسیون
۳۲	..... ۶-۳-۳ محاسبه شاخص‌های فرآیندی
۳۳	..... ۴-۳ جمع‌بندی
۳۵	..... فصل چهارم: نتایج تحقیق
۳۶	..... ۱-۴ مقدمه
۳۶	..... ۲-۴ بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر فلوتاسیون زغال سنگ
۳۶	..... ۱-۲-۴ فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی با درصد خاکستر کم
۳۶	..... ۱-۱-۲-۴ نتایج درصد خاکستر و پاسخ فلوتاسیون زغال سنگ
۳۹	..... ۲-۱-۲-۴ آزمایش‌های فلوتاسیون
۳۹	..... ۱-۲-۱-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور نمک‌های کلرید

- ۴۳..... ۲-۲-۱-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور نمک‌های نیترا ته
- ۴۴..... ۳-۲-۱-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور نمک پتاسیم یدید
- ۴۵..... ۴-۲-۱-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور نمک استات سدیم
- ۴۶..... ۵-۲-۱-۲-۴ مقایسه تأثیر نمک‌های مختلف بر فلوتاسیون زغال سنگ
- ۴۷..... ۲-۲-۱-۲-۴ فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی درصد خاکستر بالا
- ۴۹..... ۱-۲-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی درصد خاکستر بالا
- ۴۹..... ۲-۲-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی و کف‌ساز
- ۵۰..... ۳-۲-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی و کلکتور با خاکستر متفاوت
- ۵۱..... ۴-۲-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور برهم کنش نمک‌های معدنی
- ۵۲..... ۵-۲-۲-۴ پایداری کف در حضور نمک‌های معدنی
- ۶۱..... ۳-۴ بررسی سینتیک فلوتاسیون
- ۶۴..... ۴-۴ جمع‌بندی
- ۶۷..... فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد
- ۶۸..... ۱-۵ مقدمه
- ۶۸..... ۲-۵ نتایج
- ۷۰..... ۳-۵ پیشنهادها
- ۷۱..... منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: اصول عملیات فلوتاسیون..... ۶
- شکل ۲-۱: تغییرات زاویه تماس نسبت به درصد کربن موجود در زغال سنگ..... ۸
- شکل ۳-۱: تأثیر رس‌ها و متفرق‌کننده‌ها بر قابلیت ترشوندگی زغال سنگ..... ۹
- شکل ۱-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور کلکتور و کف‌ساز..... ۳۹
- شکل ۲-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی منیزیم کلرید..... ۴۰
- شکل ۳-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی کلسیم کلرید..... ۴۱
- شکل ۴-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی سدیم کلرید..... ۴۱
- شکل ۵-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی پتاسیم کلرید..... ۴۲
- شکل ۶-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی کلرید..... ۴۳
- شکل ۷-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی آلومینیوم نیترات..... ۴۴
- شکل ۸-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی منیزیم نیترات..... ۴۴
- شکل ۹-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی پتاسیم یدید..... ۴۵
- شکل ۱۰-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی استات سدیم..... ۴۶
- شکل ۱۱-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف با درصد خاکستر پایین..... ۴۶
- شکل ۱۲-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف با درصد خاکستر بالا..... ۴۹
- شکل ۱۳-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف و کف‌ساز..... ۵۰
- شکل ۱۴-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف و کلکتور خاکستر بالا..... ۵۱
- شکل ۱۵-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف و کلکتور خاکستر پایین..... ۵۱
- شکل ۱۶-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور برهم‌کنش نمک‌های معدنی..... ۵۲
- شکل ۱۷-۴: تأثیر انواع نمک‌ها بر توزیع اندازه‌های حباب‌ها..... ۵۴

- شکل ۴-۱۸: تأثیر انواع نمک‌ها بر توزیع اندازه حباب‌ها ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۹: تأثیر غلظت نمک بر ارتفاع کف ..... ۵۷
- شکل ۴-۲۰: درصد همبستگی به عنوان تابعی از غلظت نمک برای الکترولیت‌های مختلف ..... ۵۹
- شکل ۴-۲۱: نمودار بازیابی تجمعی ماده سوختنی در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۲: تفاوت مقدار ماده سوختنی باقی مانده در سلول فلوتاسیون ..... ۶۳

## فهرست جداول

- جدول ۱-۳: نتایج آنالیز خوراک فلوتاسیون ..... ۲۸
- جدول ۲-۳: پارامترهای مورد بررسی برای تست های سینتیک ..... ۳۲
- جدول ۱-۴: پاسخ فلوتاسیون و میزان خاکستر برای نمک های با غلظت مختلف ..... ۳۷
- جدول ۲-۴: پاسخ فلوتاسیون و میزان خاکستر در حضور کلکتور و کف ساز ..... ۳۸
- جدول ۳-۴: نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور معرف های شیمیایی با درصد خاکستر بالا ..... ۴۷
- جدول ۴-۴: نتایج فلوتاسیون و میزان خاکستر برای نمک های با غلظت مختلف ..... ۴۸
- جدول ۵-۴: تأثیر ترکیب جفت های یونی بر همبستگی حباب ها ..... ۶۱
- جدول ۶-۴: نتایج حاصل از برآزش مدل سینتیکی مدل مرتبه یک در آزمایش های سینتیک  
فلوتاسیون ..... ۶۴



## فصل اول

### کلیات

## ۱-۱ مقدمه

یکی از پایه‌های اساسی توسعه صنعت هر کشوری، توسعه صنایع فولاد آن است. از جمله موادی که در تولید فولاد نقش ضروری دارد، زغال سنگ است. یکی از ستون‌های اساسی توسعه صنعتی کشور ما ایران بر دوش صنایع فولاد نهاده شده است. برای گسترش تولیدات صنایع فولاد کشور نیاز ضروری به زغال سنگ وجود دارد. هم‌اکنون با وجود منابع عظیم زغال سنگ کشور، بخشی از نیاز کشور ما به این ماده از طریق واردات تأمین می‌شود (یزدی، ۱۳۸۲).

با روندی که امروز دنیای صنعت و تکنولوژی در پیش دارد هر روز نیاز به مواد معدنی بیشتر می‌شود و در جهت تأمین نیازها، بهره‌وری از معادن نیز روزبه‌روز بیشتر می‌شود؛ بنابراین افزایش تولید مواد معدنی به‌عنوان ماده اولیه مورد مصرف در صنعت، موجب ایجاد معادن بزرگ‌تر و در نتیجه کم‌عیارتر می‌شود و پیشرفت تکنولوژی، استفاده از مواد اولیه با مشخصات فنی دقیق‌تری را ضروری می‌سازد. کاهش ذخایر معدنی با عیار بالا و ترکیبات کانی‌شناختی ساده نیز باعث شده است که معادنی با عیار بسیار پایین و ترکیبات کانی‌شناختی بسیار پیچیده مورد استفاده قرار گیرند و به‌موازات آن فرآوری مواد معدنی از جمله فلوتاسیون به‌عنوان روشی برتر در جدایش کانی‌ها، بویژه سولفیدی‌های پایه، اهمیت بیشتری یافته است (رضایی، ۱۳۷۵).

در گذشته با توجه به وجود ذخایر پر عیار، ماده معدنی پس از استخراج مستقیماً و یا با اندکی تغییر به‌عنوان ماده اولیه در صنایع دیگر بکار برده شد. در حال حاضر، با توجه به روبه پایان بودن ذخایر پر عیار، ذخایر کم‌عیارتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. مواد معدنی کم‌عیار برای ورود به بازار مصرف نیازمند یک سری عملیات تغلیظ و پرعیارسازی هستند. انجام عملیات فرآوری موجب افزایش ارزش افزوده ماده معدنی شده و در نتیجه فعالیت‌های معدنی از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر می‌شود. امروزه در کشور ما ذخایر پر عیار و ساده رو به اتمام بوده و ذخایر کم‌عیارتر و با کانی‌شناسی پیچیده جهت استفاده مطرح شده‌اند (اولیا زاده و همکاران، ۱۳۸۴).

کانسنگ استخراج شده از معادن به‌خصوص معادن فلزی دارای عیار مناسبی جهت استفاده در صنایع



دیگر نمی‌باشند؛ بنابراین باید در چندین مرحله عملیات فرآوری، ماده معدنی پر عیار شود. اگر کانه مورد نظر فلزی باشد، معمولی‌ترین روش برای پرعیارسازی آن فلوتاسیون است (اولیازاده و همکاران، ۱۳۸۴).

فلوتاسیون یک فرآیند اساسی پرعیارسازی کانی است که بر مبنای خواص شیمیایی فصل مشترک ذرات کانی‌ها، در محلول استوار است (رحمانی، ۱۳۸۲).

### ۱-۱-۱ فلوتاسیون

فلوتاسیون، بدون شک کارآمدترین روش کانه آرائی است و بیشترین کاربرد را در آرایش مواد معدنی دارد (نعمت‌اللهی، ۱۳۸۷). فلوتاسیون فرآیند جداسازی است که از اختلافات طبیعی در ویژگی‌های سطح مواد معدنی بهره می‌گیرد، حال اگر سطح به‌راحتی توسط آب مرطوب شود، آب‌دوست است و یا اگر سطح آب را دفع کند، آب‌گریز است. اگر سطح ذرات آب‌گریز باشد ذرات مواد معدنی می‌توانند به حباب‌ها متصل و شناور شوند (Wills & Finch, 2016).

#### ۱-۱-۱-۱ تاریخچه فلوتاسیون

امروزه فلوتاسیون یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های فرآوری مواد معدنی است. گروهی آن را به ایرانیان و برخی به یونانیان نسبت داده‌اند. در نوشته‌ای که از محمد بن منصور (قرن پانزدهم میلادی) باقی‌مانده، روشی برای جدا کردن لاجورد ذکر شده است اما هردوت<sup>۱</sup> روش بازیابی طلا را در یک حوضچه محتوی ماسه‌سنگ و طلا توأم با آماده‌سازی محیط به‌وسیله پره‌های گاز آغشته به قیر را در اوایل قرن سیزدهم میلادی نقل کرده است. در سال ۱۸۶۰ میلادی هاینز<sup>۲</sup> روش انتخابی جدایش مواد معدنی را در فاز مشترک روغن و آب نشان داد. در سال ۱۸۷۷ میلادی بسل<sup>۳</sup> و برادرانش روش شناورسازی گرافیت را در محیط رقیق روغنی ارائه دادند. در این عملیات، حباب‌های هوا با استفاده از جوشش و یا وارد کردن

---

<sup>۱</sup>Herrodotus

<sup>۲</sup>Hynes

<sup>۳</sup>Bessel

گاز دی‌اکسید کربن در داخل پالپ فراهم آمد. در سال ۱۸۸۶ میلادی کاری<sup>۱</sup> به کمک چند معرف شیمیایی روش فلوتاسیون گالن را نشان داد. در سال ۱۹۰۲ پوتر<sup>۲</sup> استرالیایی و فرمنت<sup>۳</sup> ایتالیایی اهمیت حباب‌های هوا را در شناورسازی کانی‌های سولفیدی به کمک روغن ارائه کردند. در سال ۱۹۱۳ برادفورد<sup>۴</sup> چگونگی اهمیت سولفات مس را به‌عنوان یک فعال‌کننده در فلوتاسیون بلند تشریح کرد. در سال ۱۹۱۷ کورلیز<sup>۵</sup> برای اولین بار نفتیل آمین را به‌عنوان کلکتور عرضه کرد. در سال ۱۹۲۴ سالمن و ادسر صابون اسیدهای چرب را به‌عنوان کلکتور عرضه کردند و یک سال بعد گزارتاتها توسط کیلرز<sup>۶</sup> ارائه شد. به‌طور کلی می‌توان پیشرفت و توسعه تکنولوژی فلوتاسیون در صنعت را مدیون این دانشمندان دانست (رضایی، ۱۳۷۵).

#### ۱-۱-۲ تئوری فلوتاسیون

تئوری فلوتاسیون پیچیده است و در آن از اختلاف خواص شیمی-فیزیکی سطحی دانه‌های کانی‌های مختلف استفاده می‌شود (نعمت الهی، ۱۳۸۱). پدیده‌های اساسی فلوتاسیون را می‌توان به کمک شیمی فیزیک سطوح با در نظر گرفتن سه فصل مشترک جامد/مایع/گاز تشریح نمود. فاز مایع، آب و فاز گاز معمولاً هوا است که تحت فشار متعارفی قرار دارند (نعمت الهی، ۱۳۸۱). فلوتاسیون کف به تعدادی از پدیده‌های فیزیکی-شیمیایی وابسته است. عوامل شیمیایی شامل نیروهای کششی فصل مشترک هوا-آب، هوا-جامد و جامد-مایع، فرآیندهای اتصال حباب و واکنش‌های متقابل شیمیایی در محلول فصل مشترک جامد-مایع می‌باشند. عوامل فیزیکی مؤثر در فلوتاسیون عبارت‌اند از: اندازه و شکل جامدات، اندازه حباب‌های هوا و مهم‌تر از آن هیدرودینامیک سیستم است.

از میان این پدیده‌ها، شیمی سیستم در کل محلول و در فصل مشترک مهم‌ترین عوامل می‌باشند

---

<sup>۱</sup>Carrie                      <sup>۲</sup>Potter

<sup>۳</sup>Forment                    <sup>۴</sup>Bradford

<sup>۵</sup>Corliss                      <sup>۶</sup>Kellers

زیرا این پدیده‌ها جذب سطحی و درنهایت جدایش انتخابی یک کانی از دیگری رو کنترل می‌کنند (اولیا زاده و همکاران، ۱۳۸۴). روند فرآوری مواد معدنی به‌وسیله فلوتاسیون شامل سه مکانیسم زیر است :  
(Fuerstenau et al., 2007; Bulatovic, 2007, 2010)

۱- چسبندگی انتخابی<sup>۱</sup> به حباب‌های هوا (یا فلوتاسیون واقعی<sup>۲</sup>)،

۲- دنباله‌روی<sup>۳</sup> در آبی که از میان کف<sup>۴</sup> عبور می‌کند،

۳- گیرافتادن<sup>۵</sup> فیزیکی، بین ذرات چسبیده شده به حباب‌های هوا.

#### ۳-۱-۱-۱ کاربرد فلوتاسیون

فلوتاسیون ازجمله روش‌های فرآوری است که در بیشتر صنایع، ازجمله صنایع کاغذسازی (جوهر زدایی کاغذ)، صنایع متالورژی و شیمیایی وارد شده و تحولی در آن ایجاد کرده است. فلوتاسیون درزمینه فرآوری مواد معدنی نیز جایگاه ویژه‌ای دارد که در زیر به کاربرد فلوتاسیون در فرآوری کانی‌های مختلف اشاره می‌شود (نعمت‌اللهی، ۱۳۸۱).

- فلوتاسیون زغال‌سنگ،
- فلوتاسیون کانی‌های سولفور،
- فلوتاسیون سولفورهای مس-پیریت
- فلوتاسیون مس-گالن-اسفالریت-پیریت،
- فلوتاسیون کانی‌های اکسیده و سیلیکاته:
- فلوتاسیون کانه‌های آهن
- فلوتاسیون فلدسپات از پگماتیت
- فلوتاسیون کانی‌های خانواده نمک‌های نیمه محلول

---

<sup>۱</sup> Selective Attachment

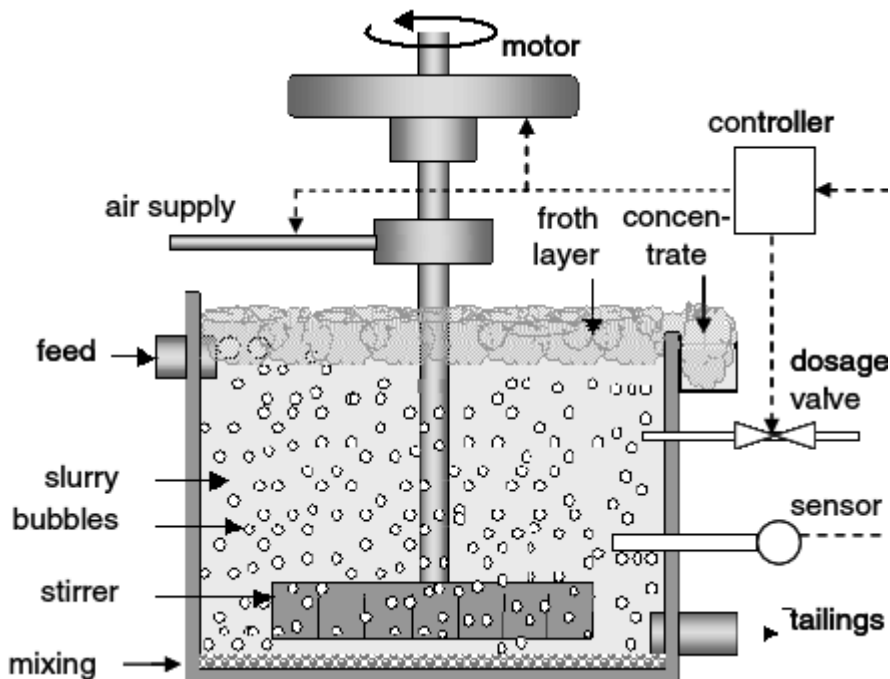
<sup>۲</sup> True Flotation

<sup>۳</sup> Entrainment

<sup>۴</sup> Froth

<sup>۵</sup> Entrapment

- فلوتاسیون کلسیت،
- فلوتاسیون انگلزیت، سروزیت و مالاکیت،
- فلوتاسیون نمک‌های محلول



شکل ۱-۱: اصول عملیات فلوتاسیون (Kramer et al., 2012)

#### ۲-۱-۱ نمک‌های معدنی

نمک‌های معدنی با تأثیر بر خواص سطحی ذرات و حباب‌ها فرآیند فلوتاسیون را بهبود می‌بخشند. طی سال‌های اخیر مطالعات زیادی در مورد بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر رفتار فلوتاسیون زغال‌سنگ بدون استفاده از مواد شیمیایی انجام شده است و نتایج آن‌ها نشان داد که نمک‌های معدنی عملکرد خوبی بر بهبود بازیابی زغال‌سنگ دارند و این امکان یا توانایی را دارند که جایگزین معرف‌های شیمیایی شوند و همچنین با استفاده از آن‌ها می‌توان در مصرف معرف‌های شیمیایی صرفه‌جویی کرد. همچنین افزودن نمک‌های معدنی به سیستم فلوتاسیون زغال‌سنگ باعث بهبود عملکرد فلوتاسیون و کاهش مصرف مواد شیمیایی می‌شود.

### ۳-۱-۱ فلوتاسیون زغال سنگ

زغال سنگ ماده‌ای به‌طور طبیعی آبران است و از عناصر میکروسکوپی قابل رویتی به نام ماسرالها<sup>۱</sup> تشکیل یافته است. فلوتاسیون یکی از روش‌های متداول فرآوری زغال سنگ‌های ریزدانه می‌باشد. تفاوت بین فلوتاسیون زغال سنگ و دیگر مواد معدنی در آن است که در مورد مواد معدنی خردایش تا حد لازم و در محدوده کاربرد فلوتاسیون باید انجام شود اما در مورد زغال سنگ، فقط آن بخش از زغال که نمی‌تواند به‌وسیله روش‌های ثقلی پرعیارسازی شود (ذرات زیر ۰/۵ میلی‌متر) با روش فلوتاسیون فرآوری می‌کنند (رضایی، ۱۳۹۴). فلوتاسیون زغال سنگ بر مبنای اختلاف خواص سطحی مابین ذرات آبران زغال سنگ و ذرات آب‌دوست گانگ با خاکستر بالا انجام می‌شود.

سه نظریه مختلف در مورد شناور شدن زغال سنگ ارائه شده است:

#### ▪ نظریه نسبت کربن به هیدروژن

بر اساس این نظریه اختلاف در قابلیت شناور شدن زغال سنگ‌های با درجه زغال شدگی یکسان به علت اختلاف در نسبت C به H آنها است. این نظریه برای زغال سنگ‌های بیتومینه و آنتراسیت صدق می‌کند اما شامل همه زغال سنگ‌ها نمی‌شود.

#### ▪ نظریه درصد کربن

بر این اساس، قابلیت فلوتاسیون زغال سنگ با افزایش درصد کربن و درجه زغال شدگی افزایش می‌یابد. این نظریه نیز جامع نیست زیرا زغال بیتومین با درصد کربن کمتر قابلیت شناور شدن بیشتری نسبت به آنتراسیت با درصد کربن بیشتر دارد.

#### ▪ نظریه ترکیب سطحی

در این نظریه، قابلیت فلوتاسیون، تابع سطحی از زغال سنگ است که توسط ترکیبات آبران موجود در زغال سنگ پوشیده شده است. هرچند زغال سنگ خاصیت آبرانی طبیعی دارد و برای شناور کردن آن نیاز به یک کف‌ساز است اما به دلیل اینکه نقاط آب‌پذیری در سطح آن یافت می‌شود، معمولاً از

---

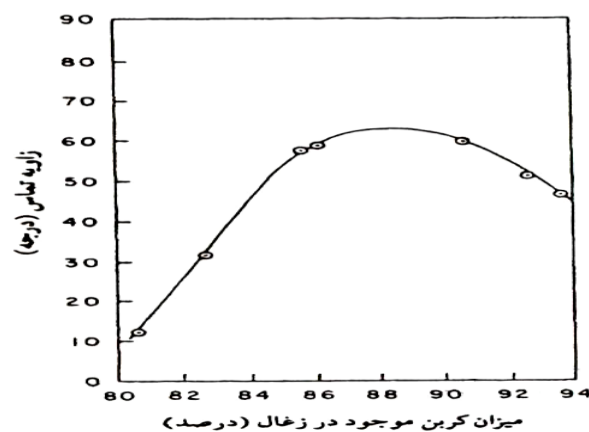
<sup>۱</sup>Macerals

روغن‌های خنثی برای پوشاندن نقاط آب‌پذیر ناشی از ساختمان غیریکنواخت زغال‌سنگ، استفاده می‌شود.

پارامترهای مؤثر بر فلوتاسیون زغال‌سنگ را می‌توان به چهار گروه تقسیم نمود (اولیازاده و همکاران، ۱۳۸۴): مشخصات زغال، مشخصات پالپ، مواد شیمیایی و مدارهای فلوتاسیون.

#### ■ مشخصات زغال‌سنگ

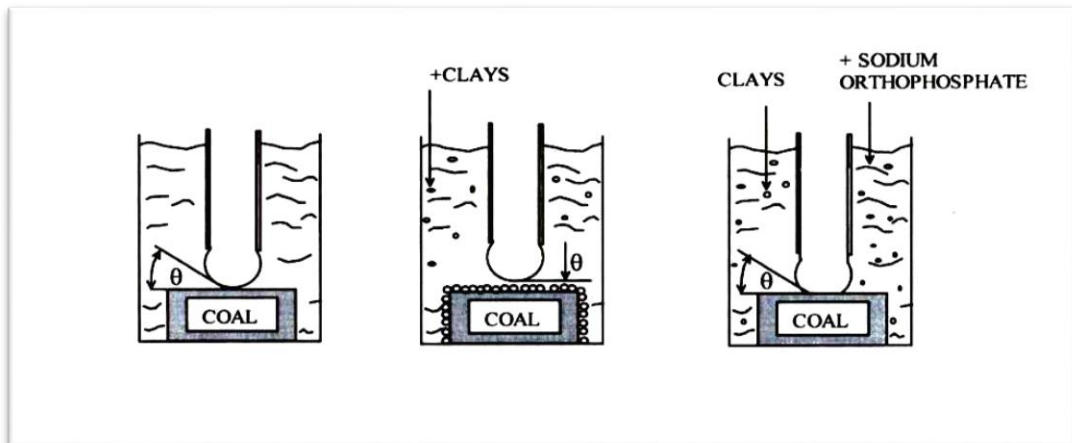
زغال‌سنگ‌های با درجه زغال شدگی متفاوت دارای ترکیبات شیمیایی و ساختار سطحی متفاوتی هستند و در نتیجه قابلیت شناور شدن آن‌ها متفاوت می‌باشد. خواص آبرانی زغال در زغال‌سنگ‌های با درجه زغال شدگی مختلف به وسیله زاویه تماس تعیین می‌شود. زاویه تماس و قابلیت شناور شدن زغال‌سنگ به مواد فرار و درصد کربن موجود در زغال‌سنگ وابسته است. شکل ۱-۲ تغییرات زاویه تماس را نسبت به درصد کربن موجود در زغال‌سنگ نشان می‌دهد. اکسیداسیون زغال‌سنگ نیز تأثیر معکوسی بر فلوتاسیون آن دارد. اکسیداسیون سطحی باعث کاهش گروه‌های هیدروکربنی و افزایش گروه‌های اکسیدی در ساختار سطحی زغال‌سنگ شده و در نتیجه ماهیت آبرانی آن را کاهش می‌دهد.



شکل ۱-۲ تغییرات زاویه تماس نسبت به درصد کربن موجود در زغال‌سنگ (رضائی، ۱۳۷۵)

شکل ۱-۳ تأثیر نرمه‌های رسی را بر قابلیت تر شوندگی سطح زغال‌سنگ نشان می‌دهد. ذرات آب‌دوست رس تمایل به جذب بر روی سطح زغال‌سنگ دارند و در نتیجه پوشاندن سطح آن باعث کاهش آبرانی زغال‌سنگ می‌شوند. تأثیر رس‌ها بر فلوتاسیون زغال‌سنگ را می‌توان با بکار بردن متفرق‌کننده‌ها،

نرمه گیری خوراک و جدا کردن آن به بخش‌های ریزدانه و درشت‌دانه و انجام فلوتاسیون جداگانه تحت شرایط فیزیکی- شیمیایی بهینه برای هر یک از آنها حذف کرد. انتخاب تجهیزات مناسب نیز می‌تواند در کاهش اثرات ناشی از نرمه‌ها مؤثر باشد. به‌عنوان مثال ماشین‌های فلوتاسیون ستونی با آب شستشو بویژه هنگامی که مقدار رس موجود در خوراک زیاد باشد می‌تواند سبب کاهش خاکستر کنسانتره گردد.



شکل ۱-۳ تأثیر رس‌ها و متفرق‌کننده‌ها بر قابلیت ترشوندگی زغال‌سنگ (رضائی، ۱۳۷۵)

#### ▪ مشخصات پالپ

مشخصات پالپ با پارامترهای اندازه ذرات، درصد جامد، میزان نرمه و pH پالپ مشخص می‌شود.

#### • اندازه ذرات

محدوده ابعادی ذرات زغال‌سنگ که در فرآیند فلوتاسیون شناور می‌شوند تابعی از درجه زغال‌شدگی، میزان و نوع کف‌ساز و یا کلکتور، دانسیته پالپ، شرایط هیدرودینامیکی در سلول فلوتاسیون و زمان فلوتاسیون می‌باشد. ابعاد بهینه ذرات زغال‌سنگ برای فلوتاسیون بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میکرون می‌باشد. معمولاً با افزایش ابعاد ذرات نرخ شناور شوندگی ذرات کاهش می‌یابد. شناور شدن ذرات درشت موجود در خوراک دارای درجه انتخابی بالا و بازیابی پایین است درحالی‌که ذرات ریزتر به‌خوبی شناور شده و دارای بازیابی بالایی می‌باشند اما درجه انتخابی فلوتاسیون برای آنها پایین است.

- درصد جامد

به عقیده کرافورد<sup>۱</sup> درصد جامد بهینه برای فلوتاسیون زغال سنگ ۱۲ درصد می باشد. در مورد ذرات درشت میزان درصد جامد افزایش می یابد. حد فوقانی و بهینه درصد جامد ۱۸ درصد است و درصد جامد کمتر از ۳ تا ۴ درصد نیز پیشنهاد نمی شود. درصد جامد بین ۳ تا ۵ درصد برای فلوتاسیون ذرات بسیار ریز (۴۰- میکرون) مناسب است.

- میزان نرمه

تمامی فرآیندهای فلوتاسیون به وجود نرمه در خوراک ورودی حساس می باشند به طوری که در برخی موارد نرمه گیری قبل از فلوتاسیون کاملاً لازم است. کیچنر<sup>۲</sup> نرمه ها را به سه تقسیم کرده است: الف) ذراتی که به صورت طبیعی به شکل کانی های رسی نظیر کائولینیت، ایلیت، مونت موریلونیت و غیره وجود دارند.

ب) ذرات ریزی که در اثر سنگ شکنی و آسیا کنی در طی عملیات کانه آرایبی به وجود می آیند.

ج) پس مانده لیچینگ کانه های خرد شده در فرآیندهای متالورژی.

کاملاً واضح است که در فلوتاسیون زغال سنگ تنها با دسته اول مواجه هستیم. نرمه ها به شدت فلوتاسیون زغال سنگ را تحت تأثیر قرار می دهند. اولاً از آنجایی که این ذرات خاکستر بالایی دارند، با راه یابی آن ها به کنسانتره در اثر دنباله روی، خاکستر کنسانتره به شدت افزایش می یابد. ثانیاً ذرات نرمه با پوشاندن سطح ذرات درشت شناور شدن آن ها را نیز تحت تأثیر قرار می دهند. این پدیده را پوشش توسط نرمه<sup>۳</sup> می گویند.

- pH

بهترین بازایی زغال در pH=7 و کمی کمتر از pH خنثی امکان پذیر است. در pH های بالا، گوگرد کاهش اما خاکستر زغال افزایش می یابد. همچنین وجود یون های مختلف نظیر آهن، آلومینیوم، کلسیم

---

<sup>۱</sup>Crawford

<sup>۲</sup>Kitchener

<sup>۳</sup>Slime coating



و غیره در پالپ که بر فلوتاسیون زغال تأثیر دارند تابعی از pH پالپ می‌باشد. بطوریکه به‌طور مثال غلظت یون‌های آهن، آلومینیوم، کلسیم و منیزیم با افزایش pH، کاهش می‌یابد.

#### ▪ مواد شیمیایی

در فرآیند فلوتاسیون به‌منظور عملکرد بهتر بازیابی مواد شیمیایی مانند کلکتور و کف‌ساز اضافه می‌شود.

#### • کلکتورها

به‌منظور افزایش تماس بین ذرات زغال‌سنگ و حباب‌ها از کلکتور و یا کمک کلکتور استفاده می‌شود. در فلوتاسیون زغال‌سنگ از هیدروکربن‌ها به‌عنوان کلکتور استفاده می‌شود. اصلی‌ترین تفاوت بین این کلکتورها و کلکتورهای یونی که برای سایر کانه‌ها از آن‌ها استفاده می‌شود، نامحلول بودن کلکتورهای هیدروکربنی در آب می‌باشد. مقدار کلکتور موردنیاز برای فلوتاسیون زغال‌های مختلف تابعی از درجه زغال‌شدگی می‌باشد. به‌طور کلی با کاهش درجه زغال‌شدگی، مصرف کلکتورهای روغنی افزایش می‌یابد. یکی از مشکلات استفاده از کلکتورهای روغنی غیر محلول، پراکندگی نامناسب آن‌ها در پالپ می‌باشد که باعث می‌شود تنها بخشی از ذرات توسط کلکتور پوشیده شوند. در چنین حالتی افزایش مجدد کلکتور نیز منجر به افزایش خاکستر محصول و کم‌تر شدن درجه انتخابی فلوتاسیون می‌شود. ویسکوزیته کلکتور یک عامل مهم در میزان پراکندگی آن در سلول می‌باشد بطوریکه با کاهش ویسکوزیته کلکتور مورد استفاده، بازیابی زغال افزایش می‌یابد.

کلکتورهای معمول در فلوتاسیون زغال عبارتند از: نفت سفید، نفت خام، نفت سوخت<sup>۱</sup> و گازوئیل.

#### • کف‌سازها

هدف از به‌کارگیری کف‌ساز، ایجاد کف پایدار در سطح سلول است. این مواد با تغییراتی که در کشش سطحی آب ایجاد می‌کنند، شرایط مناسب برای تشکیل کف را به وجود می‌آورند. در جدول ۱-۱ انواع کف‌سازهای مورد استفاده در فلوتاسیون آورده شده است. در گذشته کروزل ها و زینول ها به‌طور

---

<sup>۱</sup>fuel oil

گسترده‌ای در فلوتاسیون زغال سنگ بکار گرفته می‌شدند که امروزه جای خود را به الکل‌های آلیفاتیک یا کف‌سازهای نوع پلی گلیکول داده‌اند.

الکل‌های آلیفاتیک شامل یک گروه  $\text{OH}^-$  بوده و در آب قابلیت انحلال پایینی دارند. شاید شناخته‌شده‌ترین کف‌ساز این گروه MIBC (متیل ایزوبوتیل کربینول) باشد. کف‌سازهای نوع پلی گلیکول، اشتقاق‌های پلیمری از اکسید اتیلن یا اکسید پروپیلن می‌باشند. این گروه شامل کف‌سازهای شناخته‌شده‌ای تحت نام تجاری Downfroth می‌باشند. کف‌سازهای این گروه به‌خوبی در آب محلول می‌باشند.

در سیستم حاوی ذرات زغال سنگ و قطره‌های روغن (کلکتور)، کف‌ساز علاوه بر جذب در سطح زغال-آب در سطح روغن-آب نیز جذب می‌شود که این مسئله باعث کاهش کشش سطحی روغن-آب و افزایش امولسیون سازی کلکتور می‌شود.

#### • اصلاح‌کننده‌ها

این گروه از مواد شامل متفرق‌کننده‌ها، بازداشت‌کننده‌ها و فعال‌کننده‌ها می‌باشند.

### ۱-۲ بیان مسئله

زغال سنگ ماده‌ای است که به‌طور طبیعی آبران شناخته‌شده و مواد معدنی که همراه آن وجود دارد آب‌دوست می‌باشد. خاکستر به‌عنوان یک ناخالصی برای زغال محسوب می‌شود که باید از ترکیبات زغال سنگ حذف شود. فلوتاسیون روشی است که بر مبنای استفاده از خاصیت آبرانی و یا آب‌دوستی کانی‌ها جهت جداسازی آن‌ها پایه‌ریزی شده است و همچنین روشی بسیار مؤثر برای شست و شوی اغلب مواد معدنی است. با توجه به اینکه در بسیاری از سایت‌های معدنی و کارخانه‌های فرآوری از آب موجود در کارخانه برای چندین بار استفاده می‌کنند و همچنین با کمبود آب تازه (شرب) در بعضی از مناطق، کارخانه‌های فرآوری از آب‌های استفاده می‌کنند که دارای املاح و نمک‌هایی هستند که ممکن است تأثیر منفی بر سیستم فلوتاسیون داشته باشند، همین امر باعث شده است تحقیقات زیادی در خصوص تأثیر نمک‌ها و املاح بر روی فلوتاسیون انواع کانی‌ها صورت گیرد. افزایش بررسی تأثیرات وجود

این املاح می‌تواند موضوع بسیار مهمی است که نیاز به پژوهش اساسی دارد.

### ۳-۱ ضرورت تحقیق

با توجه به کمبود منابع آب تازه و مقررات سخت‌گیرانه بین‌المللی بر کیفیت آب‌های تخلیه، اکثر کارخانه‌های صنعتی موجود در دنیا مجبور به استفاده از آب‌های زیرزمینی، آب دریا یا آب بازیافتی کارخانه‌های خود با غلظت بالایی از املاح و نمک‌ها هستند که خود این املاح ممکن است تأثیر منفی بر عملکرد فرآیند داشته باشد. از طرفی با کمبود منابع آبی و افزایش جمعیت، استخراج آب‌های تازه افزایش و روزبه‌روز کمتر می‌شود. با توجه به رشد سریع جمعیت و توسعه صنایع مختلف، میزان آب تازه به‌سرعت در حال کاهش است بطوریکه در کشورهای کم‌آبی مانند ایران، به یک عامل حیاتی، تبدیل شده است. همان‌طور که بیان شد، صنعت معدنکاری و عملیات فرآوری مواد معدنی به مقدار قابل‌توجهی از آب برای انجام فعالیت‌های خود نیاز دارد. با این وجود بیشتر این معادن در مناطقی واقع شده‌اند که یا منابع آب تازه در آن‌ها محدود است یا مشکلات اقتصادی، استفاده از این منابع را تحت فشار قرار می‌دهد بنابراین اکثر شرکت‌های معدنی مجبورند تا مصرف آب تازه را کاهش و بیشتر از آب بازیافتی یا آب دریا استفاده کنند و تجهیزات خود را برای استفاده از آب‌هایی باکیفیت پایین‌تر سازگار سازند. عدم مطالعه دقیق و انجام آزمایش‌های مناسب قبل از به‌کارگیری آب‌های با غلظت املاح بالا در مقیاس صنعتی، ممکن است اثرات زیان‌باری بر کارایی فرآیندهای کانه‌آرایی دارد.

### ۴-۱ اهداف تحقیق

- بررسی تغییرات بازیابی زغال‌سنگ در درصد خاکستر متفاوت با استفاده از نمک‌های معدنی
- بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر روی پارامترهای عملیاتی در فلوتاسیون زغال‌سنگ
- بررسی تأثیر برهم‌کنش نمک‌ها در فلوتاسیون زغال‌سنگ
- بررسی بازیابی فلوتاسیون زغال‌سنگ در حضور یا عدم حضور معرف‌های شیمیایی
- بررسی سینتیک زغال‌سنگ در حضور و عدم حضور معرف‌های شیمیایی

## ۱-۵ ساختار پایان نامه

تحقیق از پنج فصل ساخته شده است که به صورت مختصر توضیح داده شده است.

فصل یک: شامل کلیاتی از جمله مقدمه‌ای درباره نیاز صنعت به استفاده از فلوتاسیون، کارکرد فلوتاسیون، معرفی نمک‌های معدنی و تأثیرشان بر فلوتاسیون و فلوتاسیون زغال سنگ و در ادامه شامل بیان مسئله، ضرورت انجام تحقیق و اهداف تحقیق است.

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین است که بعد از بیان آن نتایج حاصل از تحقیقات گذشته بیان شده است.

فصل سوم: تجهیزات و مواد شیمیایی به کار گرفته شده، پارامترهای عملیاتی و نحوه محاسبه شاخص فرآیندی و سینتیک فلوتاسیون در این بخش بیان شده است.

فصل چهارم: در این بخش تأثیر انواع نمک‌های معدنی و نیز تأثیر برهم کنش نمک‌ها و معرف‌های شیمیایی بر پارامترهای عملیاتی سینتیک فلوتاسیون بررسی شده است.

فصل پنجم: در این فصل نتایج حاصل از تحقیق و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ارائه شده است.

## فصل دوم

# مروری بر تحقیقات انجام شده

## ۲-۱ مقدمه

پیشرفت دانش بشری وابسته به استفاده از علوم و دانش گذشتگان و به کارگیری روش‌های نوین برای اصلاح و یا تکمیل آن‌ها است. در این بخش به مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در زمینه بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر فلوتاسیون زغال سنگ اشاره می‌شود.

## ۲-۲ تأثیر نمک‌های معدنی بر فلوتاسیون زغال سنگ

ساختار سطحی آب در غلظت بالای نمک تحت تأثیر زیادی قرار می‌گیرد و باعث به وجود آمدن یک سری واکنش‌های کلوئیدی بین حباب و ذرات محلول در آب می‌شود، بنابراین در فلوتاسیون مواد معدنی تأثیرگذار است. همچنین تحقیقات مختلف نشان داد که یون‌های حل شده در سیستم فلوتاسیون تأثیر قابل توجهی بر فلوتاسیون مواد معدنی مانند پتاس، ترونا در محلول‌های نمکی و زغال سنگ در آب شور دارند (Yoon and Sabey 1989, Laskowski 1994; Celik et al. 2002; Ozdemir et al. 2010).

تعدادی از کارخانه فرآوری در جهان، از آب‌های فرآیندی با غلظت بالای نمک استفاده می‌کنند. با این حال استفاده از آب‌های فرآیندی و شور در فرآیند فلوتاسیون علاقه زیادی را برای چندین سال به خود جذب کرده است زیرا یون‌های نمکی موجود در آب می‌توانند فرآیند فلوتاسیون زغال سنگ را افزایش دهند. از زمانی که ماجر و همکاران در سال ۱۹۳۴ کشف کردند که زغال سنگ می‌تواند با افزایش غلظت نمک بدون استفاده از معرف‌های شیمیایی شناور شود، تئوری‌های زیادی برای توضیح رفتار فلوتاسیون زغال سنگ در محلول نمکی مطرح شد (Majer et al., 1934).

در سال ۱۹۹۲ لی و سوماسونداران<sup>۱</sup> نقش نیروهای دولایه الکتریکی و هیدروفوبی را در فلوتاسیون زغال سنگ در محلول NaCl بررسی کردند. در این مطالعه، شناوری زغال سنگ بیتومین دار در محلول NaCl با استفاده از لوله هالیموند اصلاح‌شده مورد بررسی قرار گرفت تا نقش برهم‌کنش الکترواستاتیک بین حباب-ذرات و هیدروفوبیت زغال تعیین شود. اندازه‌گیری‌های پتانسیل زتا نشان داد که حباب‌ها

---

<sup>۱</sup>Somasundaran

در کل محدوده pH تست شده بار منفی دارند، درحالی که ذرات زغال سنگ در pH بالاتر از ۶ بارشان منفی است. همچنین، هر دو یون سدیم و کلرید ثبت شدند تا به عنوان یون های مختلف برای ذرات زغال سنگ و حباب ها عمل کنند. نقطه ایزو الکتريک زغال pH=۶ بود و از حباب ها توسط برون یابی ۱/۵ pH= به دست آمد. شناوری زغال سنگ اندازه گیری شده به عنوان تابعی از pH حداکثر و حداقل در غلظت های کم نمک نشان داد که در غلظت بالای نمک (بیش از ۰/۱ mol / dm<sup>3</sup>)، شناوری<sup>۱</sup> توسط برهم کنش الکترواستاتیک بین حباب و ذرات کنترل می شود (Li and Somasundaran., 1992).

در سال ۲۰۰۲ هاروی و همکاران تأثیر برهم کنش دولایه الکتريکی را بر فلوتاسیون زغال سنگ بررسی کردند. در این تحقیق، شناوری زغال سنگ در محلول های NaCl و MgCl<sub>2</sub> با استفاده از یک لوله هالیموند اصلاح شده برای بررسی نقش برهم کنش دولایه الکتريکی بین حباب ها و ذرات انجام شد. شناوری زغال سنگ به شدت وابسته به تغییرات pH محلول، نوع الکترولیت و غلظت الکترولیت بود. با افزایش غلظت الکترولیت، فلوتاسیون زغال سنگ در محلول های با غلظت کم الکترولیت کاهش یافت اما در محلول های با غلظت الکترولیت بالا افزایش یافت. در آب دریا، غلظت الکترولیت تقریباً در حدود ۰/۵ مولار است، فلوتاسیون زغال سنگ به طور قابل توجهی افزایش یافت و بالاتر از آب مقطر بود. زاویه تماس در حدود ۸۶ درجه بود و نشان داد که ذرات زغال سنگ به شدت هیدروفوب هستند. مقدار پتانسیل زتا برای ذرات زغال سنگ با درجه زغال شدگی مشابه مقایسه شد و نشان داد که ذرات زغال سنگ در محلول NaCl با pH حدود ۳ تا ۱۲ بار منفی دارند. در محلول های MgCl<sub>2</sub> پتانسیل زتا ذرات زغال سنگ نیز در محدوده وسیعی از pH منفی بود و در pH بالا به مثبت تبدیل شد، به احتمال زیاد به علت ته نشینی<sup>۲</sup> (ترسیب) هیدروکسید منیزیم بود. نقطه ایزو الکتريک ذرات زغال سنگ نمونه برداری شده در pH پایین در حدود ۲pH تا ۳ دیده شد. در محدوده pH محلول های NaCl مطالعه شده، پتانسیل زتا ذرات زغال سنگ و حباب های گاز منفی بود و با افزایش غلظت الکترولیت غلظت نمک کاهش یافت که

---

<sup>۱</sup>Floatability

<sup>۲</sup>Precipitation

نشان دهنده این بود که با افزایش غلظت الکترولیت‌ها، نیروی دافعه‌ی دولایه الکتریکی به شدت به سمت صفر بویژه در غلظت‌های بالاتر میل می‌کند و دولایه الکتریکی فشرده می‌شود (Harvey et al., 2002).

در سال ۲۰۰۶ کمال دوموس تأثیر یونی الکترولیت‌ها و pH را بر پتانسیل زتا ذرات ریز زغال‌سنگ را بررسی کرد. نمونه‌های زغال‌سنگ استفاده‌شده در اندازه‌های ۴، ۱۲، ۴۰ مش جدا شدند. سپس این نمونه‌ها به منظور فرورفتن\_شناور شدن در محلول ZnCl<sub>2</sub> با چگالی ۱/۳ در نظر گرفته شدند. نمونه استفاده‌شده برای تعیین پتانسیل زتا توسط سنگ‌شکنی هر دو نمونه زغال‌سنگ فرورفته و شناور شده به زیر ۱۰۰ مش آماده شد. نتایج آزمایش‌ها به منظور بررسی تأثیر pH سوسپانسیون و غلظت الکترولیت‌ها بر پتانسیل زتا ذرات زغال‌سنگ، با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس<sup>۱</sup> آنالیز شد. این مطالعه نشان داد که بار سطحی ذرات زغال‌سنگ در انواع و غلظت‌های مختلف الکترولیت‌ها همچنین در محلول‌های با pH مختلف متفاوت است. با توجه به نتایج حاصل از این تجزیه و تحلیل، یون‌های K<sup>+</sup>، Ca<sup>2+</sup> و NO<sub>3</sub><sup>-</sup> بر روی سطح ذرات زغال‌سنگ اثر جزئی در پتانسیل زتا داشت. باین حال، یون‌های Al<sup>3+</sup>، SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> و CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> بر روی سطح ذرات زغال‌سنگ تأثیر قابل توجهی بر پتانسیل زتا مشاهده شده داشتند. علاوه بر این، پتانسیل زتا ذرات زغال‌سنگ به حداکثر در ۰/۱ مولار محلول‌های الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی می‌رسد. علاوه بر این، در این مطالعه مشاهده شد که بار سطحی ذرات زغال‌سنگ در pH پایین کاهش یافته و در pH بالا افزایش یافته است (Kemal Doymus., 2006).

در سال ۲۰۰۹ ازدمیر و همکاران جنبه‌های شیمی سطحی فلوتاسیون زغال‌سنگ را در آب گمانه<sup>۲</sup> بررسی کردند. در این مطالعه جنبه‌های شیمی سطح فلوتاسیون زغال‌سنگ در آب هایپر سالین<sup>۳</sup> (شوری بالای آب) با استفاده از اندازه‌گیری زمان اتصال (چسبندگی)<sup>۴</sup> ذره-حباب، اندازه‌گیری پتانسیل زتا، اندازه‌گیری سیکل زاویه تماس و (AFM) بررسی شد. آزمایش‌های زمان اتصال (چسبندگی) نشان داد

---

<sup>۱</sup>Anova

<sup>۲</sup>Bore Water

<sup>۳</sup>Hyper Salin

<sup>۴</sup>Attachment time



که اتصال ذره-حباب در آب دی یونیزاسیون لحظه‌ای و مستقل از اندازه ذرات است. اتصال در آب گمانه نیاز به زمان بیشتری است که با افزایش اندازه ذرات افزایش می‌یافت. اندازه‌گیری‌های سیکل<sup>۱</sup> زاویه تماس در سطح زغال صاف<sup>۲</sup> نشان داد که آب‌گریزی زغال سنگ در حضور یون‌های نمکی تغییر نمی‌کند. اندازه‌گیری‌های پتانسیل زتا نشان داد که هر دو ذرات زغال سنگ و حباب‌های هوا در آب تازه دارای بار منفی هستند. آزمایش‌های AFM نشان داد که نیروی دافعه بین حباب و ذرات در آب تازه کاهش می‌یابد اما اثر کمی بر روی نیروی چسبندگی (کشش سطحی) دارد. نتایج نشان داد که ذرات زغال سنگ می‌توانند در آب تازه که شامل یون‌های  $Na^+$  و  $Mg^{2+}$  است بدون نیاز به استفاده از هر کف‌سازی یا کلکتوری شناور شوند و ۸۵ درصد کنسانتره زغال سنگ تولید کنند. نتایج فلوتاسیون نشان داد که ۹۰ درصد ذرات زغال سنگ در عرض ۱ دقیقه شناور می‌شوند که سینتیک سریع فلوتاسیون را در حضور یون‌های نمکی نشان داد. فلوتاسیون زغال سنگ در آب تازه برای درک شیمی سطح فلوتاسیون زغال سنگ نیز مورد بررسی قرار گرفت (Ozdemir et al., 2009).

در سال ۲۰۱۱ کورنیاوان و همکاران فلوتاسیون ذرات زغال سنگ را در محلول  $MgCl_2$ ,  $NaCl$  و  $NaClO_3$  در غیاب و حضور کف‌ساز Downfroth 250 بررسی کردند. در این فلوتاسیون ذرات زغال سنگ در محلول  $MgCl_2$ ,  $NaCl$  و  $NaClO_3$  در غیاب و حضور کف‌ساز Downfroth 250 بررسی شد برای روشن شدن مکانیسم فلوتاسیون و ارتباط بازیابی فلوتاسیون با پایداری و توزیع اندازه حباب‌ها در فاز کف انجام شد. نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون نشان داد که حضور الکترولیت‌ها در سیستم به روشنی افزایش می‌دهد بازیابی فلوتاسیون را که وابسته به نوع نمک و غلظت نمک دارد. در طول آزمایش‌ها  $MgCl_2$  بیشترین عملکرد و  $NaClO_3$  کمترین عملکرد را در بهبود فلوتاسیون داشتند بطوریکه در غلظت ۰/۱ مولار، بازیابی  $MgCl_2$  و  $NaClO_3$  به ترتیب ۸۹٪ و ۵۰٪ بود. تست‌های پایداری کف نشان داد که ارتباطی بین بازیابی فلوتاسیون و پایداری کف وجود دارد. بیشترین پایداری کف برای نمک  $MgCl_2$  و

<sup>۱</sup>Cyclic measurements

<sup>۲</sup>Flat coal

کمترین پایداری کف برای نمک  $\text{NaClO}_3$  به دست آمد. علاوه بر این یک ارتباط مستقیم بین بازیابی فلوتاسیون و توزیع اندازه حباب‌ها در فاز کف پیدا شد. اندازه‌گیری اندازه حباب‌ها نشان داد که با افزایش غلظت الکترولیت، اندازه حباب‌ها کاهش می‌یابد که بازیابی فلوتاسیون را افزایش می‌دهد. نتیجه شد که اضافه کردن محلول نمکی به سیستم فلوتاسیون تولید اندازه حباب‌های ریزتری در فاز کف می‌کند که سینتیک فلوتاسیون زغال سنگ را افزایش می‌دهد که بستگی به نوع و غلظت الکترولیت‌ها دارند (2011, Kurniawan et al).

در سال ۲۰۱۳ ارهان ازدمیر تأثیر ویژه یونی نمک‌های کلرید را بر روی فلوتاسیون زغال سنگ بدون استفاده از کلکتور بررسی کرد. در این مطالعه فلوتاسیون زغال بیتومین دار در حضور محلول‌های نمکی  $\text{CaCl}_2$  و  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$  بدون استفاده از هیچ نوع ماده شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این پتانسیل زتا و تست‌های پایداری کف انجام شد. نتایج فلوتاسیون زغال سنگ نشان داد که رفتار فلوتاسیون زغال سنگ تحت تأثیر این نمک‌های حل شده قرار گرفت و توسط تأثیر ویژه این یون‌ها تعیین شد همچنین تأثیر نمک‌ها بر بازیابی زغال سنگ بستگی به نوع و غلظت نمک داشت بطوریکه محلول  $\text{MgCl}_2$  بیشترین و  $\text{KCl}$  کمترین بهبود عملکرد فلوتاسیون را با بازیابی ۹۵٪ و ۸۹٪ در غلظت ۰/۱ مولار نشان دادند. تست‌های پایداری کف در غلظت ۰/۱ مولار نمک نشان داد که ارتباطی بین بازیابی فلوتاسیون و پایداری کف وجود دارد. این نتایج به روشنی نشان داد که یون‌های  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  تأثیر یونی ویژه‌ای بر بازیابی فلوتاسیون ذرات زغال سنگ دارد و یک غلظت بهینه نمک برای تولید زغال تمیز در این محلول نمکی وجود دارد (2013, Ozdemir).

در سال ۲۰۱۴ ژانگ تأثیر افزودن الکترولیت را بر پاسخ فلوتاسیون زغال سنگ بررسی کرد. در این مطالعه فلوتاسیون ذرات زغال سنگ آبران در محلول نمکی با کاتیون‌های مختلف  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Al}^{3+}$  برای روشن شدن مکانیسم عملکرد فلوتاسیون بررسی شد. جنبه‌های شیمی سطحی با استفاده از اندازه‌گیری پتانسیل زتا و اندازه‌گیری زمان اتصال ذره-حباب بررسی شد. نتایج آزمایش نشان داد که حضور الکترولیت‌ها در سیستم فلوتاسیون به‌وضوح عملکرد فلوتاسیون را افزایش می‌دهد که بستگی به

نوع و غلظت نمک دارد. در این آزمایش محلول  $AlCl_3$  بیشترین عملکرد و  $NaCl$  کمترین عملکرد را در بهبود عملکرد فلوتاسیون با مقدار بازیابی ۹۹٪ و ۹۳٪ در غلظت ۰/۲ مولار داشتند. همچنین نتایج نشان داد که کاتیون‌های فلزی سه‌ظرفیتی تأثیر قوی‌تری بر بار سطحی ذرات دارند. اندازه‌گیری‌های پتانسیل زتا نشان داد که  $AlCl_3$  تأثیر قوی‌تری بر بار سطحی ذرات زغال‌سنگ از  $CaCl_2$  یا  $NaCl$  دارد. اندازه‌گیری زمان القایی<sup>۱</sup> نشان داد که اتصال با افزایش غلظت نمک و ظرفیت یونی کاهش می‌یابد. علاوه بر این حباب‌های ریز فراوانی در غلظت بالای نمک به‌خصوص  $AlCl_3$  تولید شدند که از همبستگی حباب‌ها جلوگیری کردند و پایداری کف را افزایش دادند. نتیجه شد که افزودن محلول نمکی به سیستم فلوتاسیون عملکرد فلوتاسیون را افزایش می‌دهد بویژه برای محلول‌های الکترولیت ظرفیت بالا که این را می‌توان به فراوانی حباب‌های ریز در فاز کف، نوع نمک و غلظت نمک نسبت داد (Zhang, 2014).

در سال ۲۰۱۴ وانگ و همکاران تأثیر آب‌شور را بر فلوتاسیون ذرات ریزودرشت زغال‌سنگ در حضور کانی‌های رسی مطالعه کردند. نمونه‌های زغال‌سنگ استفاده‌شده در این مطالعه از دو معدن متفاوت کانی‌های رسی BHP Billiton Mitsubishi Alliance (BMA) و Xstrata برای نشان دادن فلوتاسیون ذرات درشت زغال‌سنگ و ذرات ریز زغال‌سنگ مورد آزمایش قرار گرفتند. آب‌شور با قدرت‌های یونی کم، متوسط و بالا و الکترولیت‌های تک‌ظرفیتی مورد استفاده قرار گرفت. نشان داده شد که آب‌شور تأثیر بیشتری بر روی شناوری زغال ریز نسبت به زغال درشت دارد، با وجود اینکه ترکیب کانی‌ها و حضور کانی‌های رسی مشابه بودند. فلوتاسیون زغال ریز در حضور کانی‌های رسی وقتی که رسانایی<sup>۲</sup> آب‌شور کم بود، بازیابی مواد قابل احتراق و مواد معدنی کم بود. با افزایش رسانایی آب به‌طور قابل توجهی، بازیابی مواد قابل احتراق و مواد معدنی افزایش یافت. به دلیل اینکه آب‌شور پایداری کف، تجمع<sup>۳</sup> ذرات ریز زغال و به دام انداختن ذرات گانگ را افزایش می‌دهد. آب‌شور تأثیر کمتری بر فلوتاسیون ذرات درشت زغال در حضور کانی‌های رسی داشت. اگرچه آب‌شور باعث افزایش پایداری کف در هر دو فلوتاسیون ذرات ریزودرشت شد، اما

---

<sup>۱</sup>Induction time

<sup>۲</sup>Conductivity

<sup>۳</sup>Aggregation

تجمع ذرات زغال سنگ فقط بین ذرات ریز زغال رخ داد که منجر به افزایش بازیابی ذرات زغال سنگ و همچنین به دام افتادن کانی های گانگ شد (Wang et al., 2014).

در سال ۲۰۱۶ ساسدو و همکاران تأثیر محلول های نمکی KI, NaCl, MgCl<sub>2</sub> و Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> را بر توزیع اندازه حباب ها و ارتباط با فلوتاسیون ذرات زغال سنگ و مواد معدنی بررسی کردند. در این تحقیق، فلوتاسیون زغال سنگ در محلول های نمکی KI, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub> و NaCl در غیاب کف سازها مورد بررسی قرار گرفت. هنگامی که غلظت یون های Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> و Mg<sup>2+</sup> نسبتاً بالا باشد (بین 30-70 g/L) حضور حباب های ریز (بین ۰/۵ تا ۱/۶۷ میلی متر از نظر قطر) افزایش می یابد و این شرایط مطلوب فلوتاسیون می باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت Na<sup>+</sup> و Mg<sup>2+</sup> بازیابی زغال سنگ را تا حدود ۸۵٪ افزایش می دهند. محلول هایی با غلظت های بالای K<sup>+</sup> و I<sup>-</sup> با بازیابی های متوسط بین ۷۷٪-۴۴ همراه هستند، در حالی که ترکیب یون های Na<sup>+</sup> و SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> بازیابی ماده معدنی در کنسانتره را تا ۶۰٪ افزایش می دهند (Saucedo et al., 2016).

در سال ۲۰۱۷ لی و همکاران تأثیر کلرید سدیم بر فلوتاسیون ذرات ریز زغال سنگ و بحث بر اساس پایداری کف و تجمع<sup>۱</sup> ذرات را بررسی کردند. در این تحقیق تأثیر کلرید سدیم بر روی فلوتاسیون نمونه های زغال ریز بررسی شد. نتایج نشان داد که فلوتاسیون زغال سنگ به شدت وابسته به تغییرات غلظت کلرید سدیم است. افزایش غلظت کلرید سدیم باعث افزایش بازیابی قابل احتراق و همچنین مقدار خاکستر محصولات شد. پایداری کف و توزیع اندازه ذرات در پالپ با غلظت های مختلف کلرید سدیم اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که افزایش پایداری و بزرگی اندازه ذرات هر دو برای بازیابی ذرات زغال سنگ در فلوتاسیون مناسب بود. مکانیسم پایه با بررسی پتانسیل زتا ذرات خالص زغال سنگ و رئوگرافی پالپ مورد بررسی قرار گرفت. اندازه گیری های رئولوژی<sup>۲</sup> پالپ به وضوح نشان می دهد که تغییرات در پایداری کف مرتبط با تغییرات ویسکوزیته پالپ بود که بازیابی ذرات زغال سنگ را افزایش می دهد.

<sup>۱</sup>Coagulation

<sup>۲</sup>Rheology

کاهش پتانسیل زتا منجر به افزایش اندازه ذرات در پالپ به علت به هم چسبندگی ذرات زغال سنگ بود که به دلیل کاهش دافعه الکترواستاتیک بین ذرات ایجاد شده است. اندازه ذرات با افزایش غلظت کلرید سدیم به دلیل چسبندگی ذرات زغال به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. از دیدگاه سینتیک فلوتاسیون، افزایش اندازه ذرات باعث افزایش نیروی اینرسی<sup>۱</sup> ذرات می شود و در نهایت باعث افزایش برخورد و اتصال بین حبابها و ذرات زغال سنگ می شود. افزایش تعداد ذرات متصل به حباب همچنین باعث بهبود پایداری کف می شود. لازم به ذکر است که کلرید سدیم همچنین منجر به افزایش مقدار خاکستر کنسانتره می شود بخشی از ذرات باطله می توانند در اتصال با زغال سنگ به دلیل دنباله روی در محلول کلرید سدیم بازیابی شوند (Li et al., 2017).

## ۳-۲ جمع بندی

نتایج حاصل از مطالعات گذشته عبارتند از:

۱- نتایج نشان داد که تأثیر نمکها بر بازیابی زغال سنگ بستگی به نوع و غلظت نمک دارد و به طور قابل توجهی فلوتاسیون زغال سنگ را بهبود می بخشد. بازیابی قابل احتراق با افزایش غلظت نمکهای معدنی افزایش می یابد. افزایش ویسکوزیته پالپ نقش مهمی در ایجاد پایداری کف ایفا می کند.

۲- با توجه به افزایش غلظت نمکهای معدنی، پتانسیل زتا ذرات زغال سنگ کاهش می یابد و باعث تجمع ذرات با کاهش دافعه الکترواستاتیک بین ذرات می شود. اندازه ذرات با افزایش غلظت نمکهای معدنی به دلیل پدیده چسبندگی و تجمع ذرات به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. از دیدگاه سینتیک فلوتاسیون، بزرگ شدن اندازه ذرات باعث افزایش نیروی اینرسی ذرات می شود و در نهایت باعث افزایش برخورد و اتصال بین حبابها و ذرات زغال سنگ می شود. افزایش تعداد ذرات متصل شده به حبابها همچنین باعث بهبود پایداری کف می شود.

۳- نمکهای معدنی همچنین منجر به افزایش مقدار خاکستر کنسانتره می شوند. بخشی از ذرات

---

<sup>۱</sup>Inertia

باطله می‌تواند در اتصال با زغال سنگ به دلیل به دام افتادن در محلول‌های نمکی بازیابی شوند. نمک‌های معدنی مورد استفاده شده در این تحقیق با توجه به منابع بررسی شده انتخاب شده است و نتایج حاصل از تحقیقات گذشته تقریباً با نتایج حاصل از کار من مطابقت دارد بطوری که نمک‌های معدنی روند تقریباً مشابهی را در مقدار بازیابی ماده سوختنی نشان می‌دهند و مقدار بازیابی ماده سوختنی تقریباً یکسان است. با توجه به اینکه نمک‌های معدنی انتخاب شده یکسان است ولی شرایط آزمایشگاهی مانند درصد جامد، اندازه ذرات، زمان آماده‌سازی و غیره متفاوت است.

## فصل سوم

### مواد و روش‌ها

### ۳-۱ مقدمه

انجام عملیات فلوتاسیون نیازمند فراهم نمودن مواد اولیه، آشنایی با دستگاه‌ها و شناخت دقیق عملکرد آن، مشخص کردن شرایط کلی برای انجام هر آزمایش، معین کردن پارامترهای مورد بررسی و پارامترهای پاسخ و نحوه محاسبه هر یک از آن‌ها و در نهایت انجام آزمایش‌ها است. در این فصل ابتدا مختصری درباره تجهیزات، دستگاه‌ها و مواد مورداستفاده در آزمایش‌ها شرح داده می‌شود و سپس چگونگی تهیه و آماده‌سازی زغال‌سنگ ارائه می‌گردد. در انتهای این فصل به اختصار به نحوه ارزیابی سینتیک فلوتاسیون و محاسبه آزمایش بازیابی، بازیابی مواد سوختنی پرداخته می‌شود.

### ۳-۲ مواد و تجهیزات

۳-۲-۱ مواد شیمیایی مورداستفاده

نمک سدیم کلرید NaCl

نمک پتاسیم کلرید KCl

نمک منیزیم کلرید  $MgCl_2$

نمک کلسیم کلرید  $CaCl_2$

نمک پتاسیم یدید KI

نمک آلومینیوم نیترات  $Al(NO_3)_3$

نمک منیزیم نیترات  $Mg(NO_3)_2$

استات سدیم  $CH_3COONa$

نفت سفید به‌عنوان کلکتور برای کمک به آبرانی سطح زغال‌سنگ

MIBC به‌عنوان کف‌ساز برای تولید کف پایدار در فلوتاسیون

۳-۲-۲ تجهیزات مورداستفاده

سنگ‌شکن فکی: به‌منظور خردایش نمونه‌های گرفته‌شده؛



سرنده‌های استاندارد و شیکر آزمایشگاهی: پس از عملیات خردایش برای رسیدن به محدوده ابعادی دانه‌بندی موردنظر استفاده شد؛

ماشین فلوتاسیون مکانیکی: برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از سلول مکانیکی دنور با حجم سلول یک لیتری استفاده شد؛

دستگاه pH متر: برای تنظیم pH آب مورد استفاده در فرآیند فلوتاسیون استفاده شد؛

ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۱ گرم

کوره الکتریکی

آون

۳-۳ روش‌ها

۳-۳-۱ تهیه و آماده‌سازی نمونه

نمونه زغال سنگ مورد استفاده در این تحقیق از معدن طزره واقع در شهرستان شاهرود تهیه شد. دو نمونه زغال سنگ از بار ورودی کارخانه فرآوری با دو درصد خاکستر متفاوت برای انجام تست‌های فلوتاسیون تهیه شد. در ابتدا نمونه زغال سنگ مورد استفاده توسط سنگ‌شکن فکی تحت خردایش قرار گرفت و محصول آن مورد دانه‌بندی قرار گرفت. آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM انجام شد. محدودی ابعادی زغال سنگ دانه‌بندی شده بین ۶۰۰ - ۷۴ میکرون بود.

۳-۳-۲ تعیین درصد خاکستر

زغال سنگ مانند سایر کانی‌های دیگر ناخالصی‌های دارد. یکی از این ناخالصی‌ها خاکستر است که مقدار آن باید به حداقل برسد بطوریکه یکی از پارامترهای تعیین کننده کیفیت زغال سنگ، خاکستر است. زغال سنگ معمولاً با موادی غیرقابل سوختن همراه است که به آن خاکستر می‌گویند و از آنجایی که این مواد تأثیر منفی و نامطلوبی بر کیفیت زغال سنگ در صنعت خواهد داشت، قبل از استفاده باید شستشو و از محیط خارج شوند.

با توجه به استاندارد ASTM\_D3174 برای تعیین میزان خاکستر، ۱ تا ۲ گرم از نمونه زغال را پس از عبور دادن از محدوده ابعادی موردنظر وزن کرده و داخل بوته ریخته سپس بوته چینی به مدت یک ساعت و سی دقیقه داخل کوره در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بوته پس از خارج شدن و خنک توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ وزن شد.

$$\% \text{ Ash} = \left(\frac{B}{A}\right) \times 100(1-3)$$

$$B = C - D(2-3)$$

Ash: درصد خاکستر موجود در نمونه (/.)؛

A: وزن نمونه زغال سنگ (گرم)؛

B: وزن خاکستر (گرم)؛

C: وزن بوته خارج شده از کوره (گرم)؛

D: وزن بوته خالی (گرم).

۱-۲-۳-۳ آنالیز خوراک اولیه فلوتاسیون

پس از انجام و آماده‌سازی نمونه، میزان خاکستر در دامنه ابعادی تعیین شد که در جدول ۱-۳ نتایج

این آنالیز ارائه شده است.

جدول ۱-۳: نتایج آنالیز خوراک فلوتاسیون

نمونه زغال سنگ	
دامنه ابعادی	-۶۰۰+۷۴
درصد خاکستر (/.)	
نمونه اول	۱۰/۵
نمونه دوم	۴۳/۶

### ۳-۳-۳ انتخاب پارامترهای موردبررسی

در فلوتاسیون زغال سنگ نسبت به سایر کانی‌ها نرخ فلوتاسیون و مقدار زغال شناور شده برحسب  $t/kw.h$  و  $t/ft^3$  حجم سلول به دلیل پایین بودن ارزش واحد زغال سنگ اهمیت خاصی دارد. تولید حباب‌های مناسب هوا و ایجاد شرایط لازم برای پیوستگی ذرات زغال سنگ به حباب‌های هوا و پایداری این مجموعه تا رسیدن به سطح کف و جمع‌آوری آن‌ها از سطح از جمله ضروریات یک فلوتاسیون موفق است (رضایی، ۱۳۹۴).

در کارایی فرآیند فلوتاسیون عوامل متعددی نقش دارند که با تعیین مقدار بهینه آن‌ها می‌توان نرخ شناورسازی ذرات را افزایش داد. این پارامترها را می‌توان در قالب ویژگی‌های پالپ (غلظت، دما، کیفیت آب، خواص هیدرودینامیکی و ...)، کف (نرخ هوادهی، عمق کف، ابعاد و بار سطحی حباب‌ها و ...)، ذرات (ابعاد، شکل، جرم مخصوص، خاصیت ابرانی، اکسایش، پوشش ذرات نرمه و ...) و ماشین‌های فلوتاسیون (ابعاد و شکل سلول، نوع همزن و ...) دسته‌بندی و بررسی نمود (قدیانی، ۱۳۹۶).

تمامی پارامترها در این تحقیق به جز غلظت کلکتور و کف‌ساز و غلظت نمک ثابت گرفته شده است. پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

درصد جامد: ۱۵ درصد؛

نوع کلکتور: نفت سفید؛

نوع کف‌ساز: MIBC

دما: دمای محیط؛

pH: خنثی؛

سرعت روتور: ۱۰۰۰ دور بر دقیقه؛

زمان آماده‌سازی: ۵ دقیقه

میزان هوادهی

پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

مقدار کلکتور: ۵۰۰-۱۰۰۰-۱۵۰۰-۲۰۰۰ گرم بر تن

مقدار کف‌ساز: ۵۰-۱۰۰-۱۵۰ گرم بر تن

غلظت نمک: ۰/۵ - ۰/۱ - ۰/۵ مولار

نمونه ۱: درصد خاکستر: ۱۰/۵

نمونه ۲: درصد ۴۳/۶

### ۳-۳-۴ آزمایش‌های فلوتاسیون

به‌منظور انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از ماشین فلوتاسیون مکانیکی نوع دنور با حجم سلول ۱/۵ لیتر استفاده شد. برای انجام هر آزمایش با استفاده از ترازوی دیجیتالی، ۱۵۰ گرم از نمونه زغال دانه‌بندی شده برداشته شد. روش انجام آزمایش مطابق با استاندارد ASTM- D5114 بوده است. عملیات فلوتاسیون با استفاده از یک سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی کوچک انجام شد. برای هر آزمایش فلوتاسیون ۱۵۰ گرم از نمونه زغال دانه‌بندی شده به سلول اضافه شد. در ادامه محلول نمکی تهیه‌شده از آب مقطر با pH=۷ با غلظت مشخص به سلول تزریق شد. سپس محتویات سلول با همزن با دور ثابت، به مدت ۳ دقیقه بدون اضافه کردن هیچ‌گونه مواد شیمیایی به هم زده شد. در نهایت کلکتور نفت سفید به مقدار ۱۵۰۰ گرم بر تن به آن اضافه شد و پس از ۱ دقیقه و اختلاط کامل، کف‌ساز MIBC به مقدار ۱۵۰ گرم بر تن به سلول اضافه شد و بعد از گذشت ۱ دقیقه شیر هوا بازشده و به مدت ۱/۵ دقیقه کف‌گیری انجام شد. کنسانتره و باطله به‌دست‌آمده پس از فیلتر شدن برای آب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار گرفتند تا رطوبت آن‌ها صفر شود. سپس به‌صورت جداگانه ۱ گرم از کنسانتره و باطله به مدت ۱/۵ ساعت در کوره با دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. وزن خاکستر باقی‌مانده برای محاسبه درصد خاکستر موجود در کنسانتره و باطله اندازه‌گیری شد.

### ۳-۳-۵ سینتیک فلوتاسیون

بر مبنای تحقیقات گذشته، فلوتاسیون نسبت به درصد ذراتی که از منطقه پالپ شناور می‌شوند

فرآیندی از درجه اول است و رابطه سینتیکی واکنش را در یک سلول غیر پیوسته به صورت زیر می توان

نوشت (رضایی، ۱۳۹۴)؛

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \quad (3-3)$$

که در آن:

$\frac{dC}{dt}$ : تغییرات غلظت ماده شناور شونده نسبت به زمان؛

C: غلظت مواد جامد اولیه که در زمان t قابل شناور شدن است؛

n: درجه واکنش شیمیایی؛

k: نرخ شناورسازی (ثابت سینتیک) فلوتاسیون است و به پارامترهایی مانند نوع و غلظت مواد

شیمیایی، شدت جریان هوا، توزیع زمان ماند، ابعاد ذره و غیره بستگی دارد.

در صورتی که فرض شود فلوتاسیون نسبت به درصد ذراتی که در پالپ شناور می شوند، فرآیندی از

مرتبه اول است، رابطه سینتیکی فلوتاسیون در یک سلول غیر پیوسته به صورت زیر تعریف می شود که

در آن  $k_1$  نرخ شناورسازی فلوتاسیون درجه یک است (رضایی، ۱۳۹۴):

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C^n \quad (4-3)$$

اگر زمان ماند و نرخ شناورسازی کلیه ذراتی که باید شناور شوند مقدار ثابتی باشد، غلظت وزنی آن

ماده در پالپ در زمان t به شرح زیر حاصل خواهد شد (رضایی، ۱۳۹۴):

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_0^t -k_1 dt \quad (5-3)$$

که در آن  $C_0$  غلظت اولیه ماده مورد نظر است و در نتیجه معادله ۳-۶ حاصل می شود (رضایی، ۱۳۹۴).

$$C = C_0 \exp(-k_1 t) \quad (6-3)$$

بخشی از مواد که در پایان زمان t به صورت غیر پیوسته شناور می شود، بازیابی نامیده شده و از رابطه

زیر محاسبه می شود (رضایی، ۱۳۹۴).

$$R = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (7-3)$$

با استفاده از روابط ۳-۶ و ۳-۷ رابطه زیر برای بازیابی در حالتی که نرخ شناورسازی و زمان ماند کلیه ذرات که باید شناور شوند مقدار ثابتی است، به دست می‌آید (رضایی، ۱۳۹۴).

$$R = 1 - \exp(-k_1 t) \quad (۸-۳)$$

این رابطه در مواردی معتبر است که بازیابی بعد از زمان بی‌نهایت معادل ۱۰۰ درصد باشد و چنانچه بازیابی بعد از زمان بی‌نهایت معادل  $R_\infty$  باشد، رابطه سینتیک فلوتاسیون درجه اول به صورت زیر خواهد بود (رضایی، ۱۳۹۴):

$$R = R_\infty [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (۹-۳)$$

آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون با پارامترهای ثابت مشابه و در شرایط استفاده از محلول نمکی و آب مقطر انجام شد.

جدول ۳-۲: پارامترهای مورد بررسی برای تست‌های سینتیک

پارامترها	کلکتور (گرم بر تن)	کفساز (گرم بر تن)	غلظت نمک (مولار)	ابعاد ذرات (میکرون)	خاکستر خوراک
مقدار	۱۵۰۰	۱۵۰	۰/۱	+۶۰۰ -۷۴	۱۰/۵

۳-۳-۶ محاسبه شاخص‌های فرآیندی

معادله‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱ به ترتیب برای محاسبه بازیابی، بازیابی مواد سوختنی مورد استفاده قرار

گرفتند (Rao, 2016; Wills & Napier-Munn, 2006).

$$Yield = \frac{f_{Ash} - t_{Ash}}{c_{Ash} - t_{Ash}} \times 100 \quad (۱۰-۳)$$

$$R_{Combustible} = \frac{(100 - c_{Ash}) \times C}{(100 - f_{Ash}) \times F} \times 100 \quad (۱۱-۳)$$

$Yield$ : بازیابی (٪)؛

$R_{Combustible}$ : بازیابی ماده سوختنی زغال‌سنگ در کنسانتره (٪)؛

$f_{Ash}$ ،  $C_{Ash}$  و  $t_{Ash}$ : متوسط خاکستر (٪) به ترتیب در خوراک، کنسانتره و باطله؛

$C$  و  $F$ : وزن (گرم) به ترتیب کنسانتره و خوراک هستند.

### ۳-۴ جمع‌بندی

در این فصل در ابتدا تجهیزات و مواد شیمیایی به کار گرفته‌شده معرفی شدند. سپس آماده‌سازی نمونه و تعیین پارامترهای انتخابی مورد استفاده بیان شد. آزمایش‌های سینتیکی با محلول‌های نمکی در حضور و عدم حضور معرف‌های شیمیایی انجام شد. در انتها نیز نحوه محاسبه سینتیک فلوتاسیون و شاخص‌های فرایندی بیان شد.





## فصل چهارم

### تفسیر نتایج تحقیق

یکی از موارد مهم برای درک تحقیق مورد مطالعه، انجام آزمایش است. قبل از اینکه آزمایش‌ها در مقیاس صنعتی انجام شود لازم است تا ابتدا آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و با مدار باز انجام می‌شود تا تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد فرایند مشخص شود. در این تحقیق تأثیر نمک‌های معدنی بر رفتار فلوتاسیون زغال‌سنگ و سینتیک فلوتاسیون بدون استفاده از کلکتور و کفساز با دو درصد متفاوت خوراک مورد بررسی قرار گرفت تا مکانیسم تأثیر این نمک‌ها بر فلوتاسیون روشن شود همچنین تست‌های برهم‌کنش نمک‌ها با یکدیگر و با کلکتور و کفساز انجام شد.

#### ۴-۲ بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر فلوتاسیون زغال‌سنگ

ذرات آب‌گریز در غلظت بالای نمک می‌توانند بدون استفاده از معرف‌ها شناور شوند که این فرآیند فلوتاسیون نمک نامیده می‌شود (Klassen & Mokrousov., 1963). در این تحقیق تأثیر انواع نمک‌ها با غلظت مختلف بر فلوتاسیون زغال‌سنگ همچنین برهم‌کنش نمک‌ها، نمک با کلکتور و کفساز مورد مطالعه قرار گرفت.

#### ۴-۲-۱ فلوتاسیون زغال‌سنگ در حضور محلول نمکی با درصد خاکستر کم

##### ۴-۲-۱-۱ نتایج درصد خاکستر و پاسخ فلوتاسیون زغال‌سنگ

یکی از پارامترهای اصلی تعیین‌کننده کیفیت زغال‌سنگ، تعیین میزان خاکستر آن است. وجود خاکستر در زغال‌سنگ، افزایش مصرف معرف‌ها، ایجاد مشکل در فرآیند تولید فولاد، افزایش مصرف کک و کاهش بازدهی آن را موجب می‌شود (رضایی، ۱۳۹۴).

نتایج پاسخ فلوتاسیون و درصد خاکستر در کنسانتره و باطله برای نمک‌های مختلف و با غلظت‌های مختلف بدون استفاده از کلکتور و کفساز جدول ۴-۱ ارائه شده است.

جدول ۱-۴: پاسخ فلوتاسیون و میزان خاکستر برای نمک‌های با غلظت مختلف

نام نمک	غلظت نمک (مولار)	خاکستر خوراک (%)	خاکستر کنسانتره (%)	خاکستر باطله (%)	بازیابی وزنی (%)	بازیابی قابل احتراق (%)
MgCl <sub>2</sub>	۰/۰۱	۱۰/۵	۳/۳۲	۱۳/۵۲	۱۴/۰۸	۱۹/۲۳
	۰/۰۵	۱۰/۵	۴/۵۶	۲۰/۷۶	۶۳/۱۰	۶۵/۴۵
	۰/۱	۱۰/۵	۵/۹۳	۳۲/۶۵	۸۲/۹۰	۸۳/۷۸
	۰/۳	۱۰/۵	۷/۲۴	۳۹/۴۵	۸۹/۷۷	۸۹/۴۸
	۰/۵	۱۰/۵	۸/۹۵	۴۹/۱۲	۹۳/۹۹	۹۳/۵۴
CaCl <sub>2</sub>	۰/۰۱	۱۰/۵	۳/۲۶	۱۲/۵۴	۱۵/۸۱	۱۶/۸۳
	۰/۰۵	۱۰/۵	۴/۷۲	۱۸/۶۵	۷۱/۸۶	۶۱/۲۶
	۰/۱	۱۰/۵	۵/۷۵	۲۵/۷۵	۸۶/۳۸	۷۹/۲۱
	۰/۳	۱۰/۵	۷/۵۲	۳۶/۴۵	۹۰/۹۹	۸۷/۱۳
	۰/۵	۱۰/۵	۸/۲۴	۴۲/۱۵	۹۲/۲۸	۹۲/۳۹
NaCl	۰/۰۱	۱۰/۵	۳/۲۳	۱۲/۵۴	۲۱/۸۵	۱۶/۰۷
	۰/۰۵	۱۰/۵	۴/۲۶	۱۸/۶۵	۵۸/۵۱	۴۰/۲۶
	۰/۱	۱۰/۵	۵/۳۲	۲۵/۷۵	۷۶/۲۵	۵۵/۴۵
	۰/۳	۱۰/۵	۶/۸۲	۳۶/۴۵	۸۹/۷۰	۸۰/۳۴
	۰/۵	۱۰/۵	۷/۶۲	۴۲/۱۵	۹۱/۳۴	۸۹/۸۴
KCl	۰/۰۱	۱۰/۵	۳/۲۵	۱۳/۴۵	۲۸/۹۲	۱۲/۵۳
	۰/۰۵	۱۰/۵	۴/۱۲	۱۷/۴۳	۵۲/۱۴	۳۳/۳۴
	۰/۱	۱۰/۵	۴/۹۵	۲۴/۶۸	۷۵/۵۸	۴۷/۶۸
	۰/۳	۱۰/۵	۶/۸۵	۲۷/۶۸	۸۷/۲۴	۷۳/۱۷
	۰/۵	۱۰/۵	۷/۳۵	۳۵/۴۵	۹۰/۲۰	۸۴/۳۶

ادامه جدول ۴-۱

۷۰/۴۶	۵۵/۵۷	۱۸/۳۹	۵/۴۱	۱۰/۵	۰/۰۵	AL(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>
۸۳/۹۱	۷۷/۶۶	۲۳/۴۶	۷/۱۸	۱۰/۵	۰/۱	
۹۱/۱۱	۹۲/۵۵	۳۳/۴۸	۸/۳۴	۱۰/۵	۰/۳	
۹۴/۹۲	۹۴/۹۴	۴۸/۵۱	۹/۳۲	۱۰/۵	۰/۵	
۵۳/۸۵	۱۵/۸۴	۱۱/۸۴	۳/۳۸	۱۰/۵	۰/۰۵	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
۷۲/۷۷	۷۰/۹۲	۲۷/۰۱	۴/۳۷	۱۰/۵	۰/۱	
۸۶/۵۰	۸۶/۶۴	۳۴/۵۷	۶/۹۱	۱۰/۵	۰/۳	
۹۲/۵۰	۹۱/۶۰	۴۴/۴۵	۸/۳۸	۱۰/۵	۰/۵	
۲۳/۳۳	۱۹/۳۸	۳۹/۴۸	۱۹/۲۵	۴۳/۶	۰/۰۵	KI*
۳۷/۹۲	۴۰/۱۵	۵۶/۳۴	۲۴/۵۶	۴۳/۶	۰/۱	
۶۲/۳۷	۶۶/۶۱	۶۳/۴۵	۳۳/۶۲	۴۳/۶	۰/۳	
۷۱/۶۳	۸۶/۸۵	۷۷/۴۵	۳۸/۴۵	۴۳/۶	۰/۵	
۹/۱۱	۷/۸۵	۱۱/۱۳	۳/۱۴	۱۰/۵	۰/۰۱	CH <sub>3</sub> COONa
۲۱/۲۹	۲۸/۵۰	۱۳/۲۵	۳/۶۲	۱۰/۵	۰/۰۵	
۲۶/۰۹	۳۸/۶۰	۱۴/۶۵	۳/۹۵	۱۰/۵	۰/۱	
۳۶/۹۳	۴۹/۷۹	۱۶/۴۵	۴/۵۲	۱۰/۵	۰/۳	
۴۴/۶۹	۶۱/۱۵	۱۸/۴۵	۵/۴۵	۱۰/۵	۰/۵	

\*نمونه خوراک با درصد خاکستر ۴۳/۶

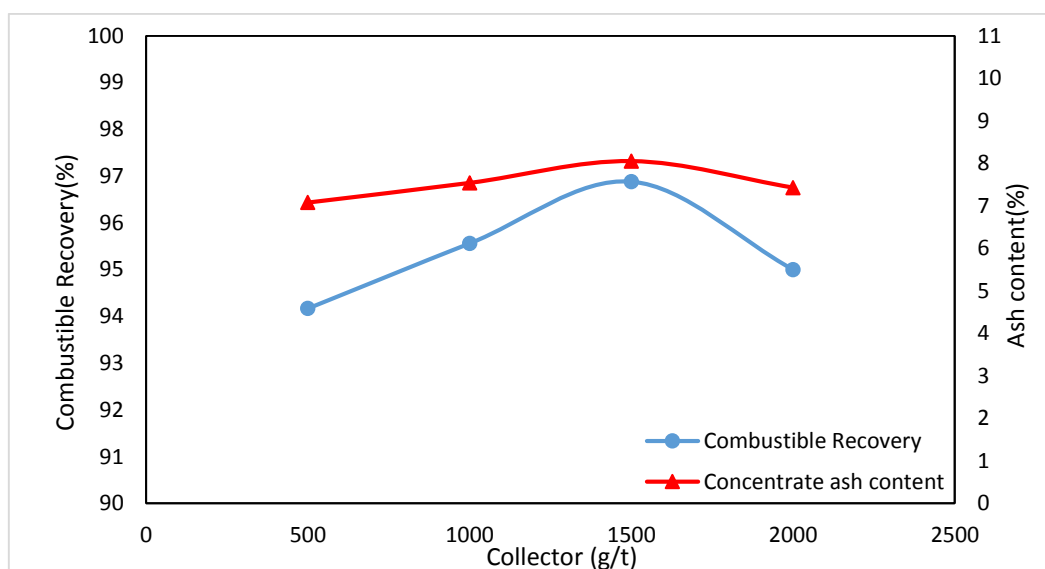
جدول ۴-۲ پاسخ فلوتاسیون و میزان خاکستر در حضور کلکتور و کفساز

کلکتور (گرم/تن)	کفساز (گرم/تن)	خاکستر خوراک (%)	خاکستر کنسانتره (%)	خاکستر باطله (%)	بازیابی وزنی (%)	بازیابی قابل احتراق (%)
۱۵۰۰	۱۵۰	۱۰/۵	۸/۰۵	۵۶/۳۲	۹۴/۹۲	۹۶/۸۸
۱۵۰۰	۱۵۰	۴۳/۶	۲۹/۵۴	۷۳/۵۷	۶۷/۹۷	۷۹/۴۹

#### ۲-۱-۲-۴ آزمایش‌های فلوتاسیون

به منظور مقایسه نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور و عدم حضور کلکتور و کف‌ساز ابتدا ۱۲ تست فلوتاسیون با غلظت‌های مختلف کلکتور و کف‌ساز برای دستیابی به بیشترین مقدار بازیابی در حضور کلکتور و کف‌ساز انجام شد. نتایج آن در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

شکل ۱-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ را در حضور ۱۵۰ گرم بر تن کف‌ساز MIBC و ۱۵۰۰ گرم بر تن کلکتور نفت سفید نشان می‌دهد.



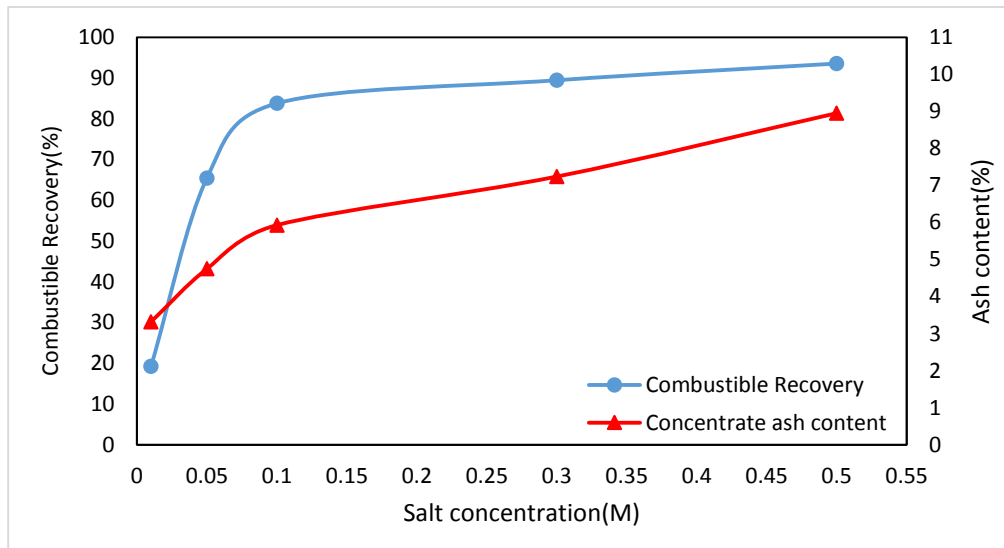
شکل ۱-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور کلکتور و کف‌ساز

همان‌طور که شکل ۱-۴ نشان می‌دهد بازیابی قابل احتراق و مقدار خاکستر کنسانتره در زغال سنگ با مقدار ۱۵۰ گرم بر تن کف‌ساز MIBC و کلکتور ۱۵۰۰ گرم بر تن نفت سفید در حدود ۹۶/۸۸ درصد و ۸/۰۵ درصد است. با افزایش غلظت کلکتور از ۱۵۰۰ گرم بر تن به بعد بازیابی قابل احتراق کاهش می‌یابد که این به دلیل پدیده مسیل شدن رخ می‌دهد.

#### ۲-۱-۲-۴-۱-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور نمک‌های کلرید بدون کلکتور و کف‌ساز

شکل ۲-۴ تأثیر افزودن نمک منیزیم کلرید ( $MgCl_2$ ) را بر فلوتاسیون زغال سنگ در عدم حضور کلکتور و کف‌ساز نشان می‌دهد. بازیابی قابل احتراق به‌عنوان تابعی از غلظت نمک در شکل ۲-۴ رسم

شده است. نتایج به دست آمده از شکل ۲-۴ نشان می‌دهد که افزودن نمک منیزیم کلرید تأثیر قابل توجهی بر بازیابی قابل احتراق زغال سنگ دارد بطوریکه با افزایش غلظت نمک بازیابی افزایش یافته است.

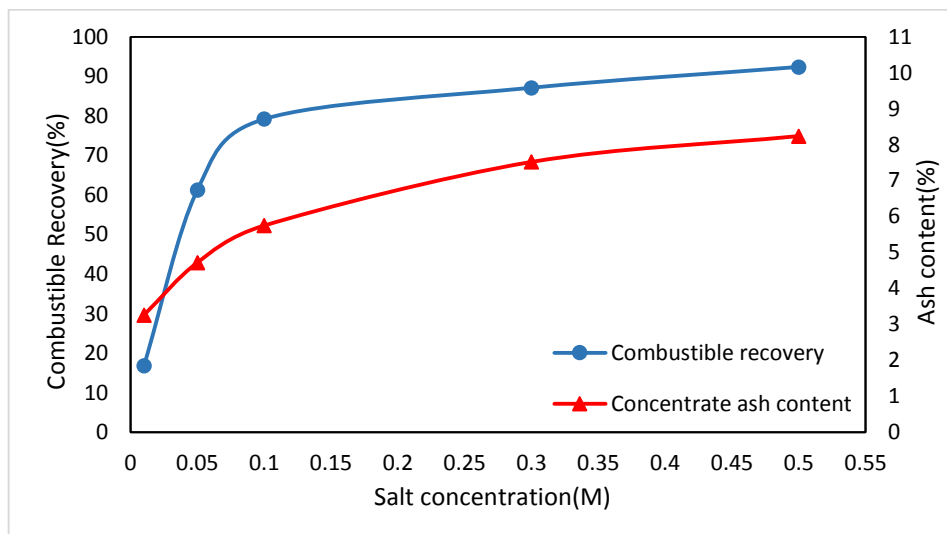


شکل ۲-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی  $MgCl_2$

همان‌طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است در غلظت ۰/۰۱ مولار نمک و با خاکستر ۳/۳۲ درصد، بازیابی قابل احتراق ۱۹/۲۳ درصد به دست آمد. با افزایش غلظت نمک از ۰/۰۱ مولار به غلظت ۰/۵ مولار، بازیابی قابل احتراق از ۱۹/۲۳ به ۹۳/۵۴ درصد رسیده است. مقایسه نتایج به دست آمده از شکل ۲-۴ با داده‌های به دست آمده از فلوتاسیون زغال در حضور ۱۵۰۰ گرم بر تن کلکتور و ۱۵۰ گرم بر تن کف‌ساز نشان می‌دهد که در غلظت ۰/۵ مولار نمک منیزیم کلرید بازیابی تقریباً به مقدار یکسانی رسیده است که این نشان‌دهنده تأثیر نمک‌ها بر فلوتاسیون زغال سنگ و عدم مصرف کلکتور و کف‌ساز است. همچنین می‌توان با غلظت کمتر نمک و مصرف کمتر کلکتور و کف‌ساز به این مقدار بازیابی دست یافت. علاوه بر این، افزایش غلظت نمک تأثیر قابل توجهی بر خاکستر محصولات داشته است بطوریکه با افزایش غلظت نمک، خاکستر محصولات روند افزایشی داشته است که این به دلیل دنباله‌روی کانی‌های خاکستر است. به عنوان مثال در غلظت ۰/۰۱ مولار نمک مقدار خاکستر محصولات ۳/۳۲ درصد بود که با افزایش غلظت نمک به ۰/۵ مولار خاکستر محصولات به ۸/۹۵ درصد رسیده است. این نتایج

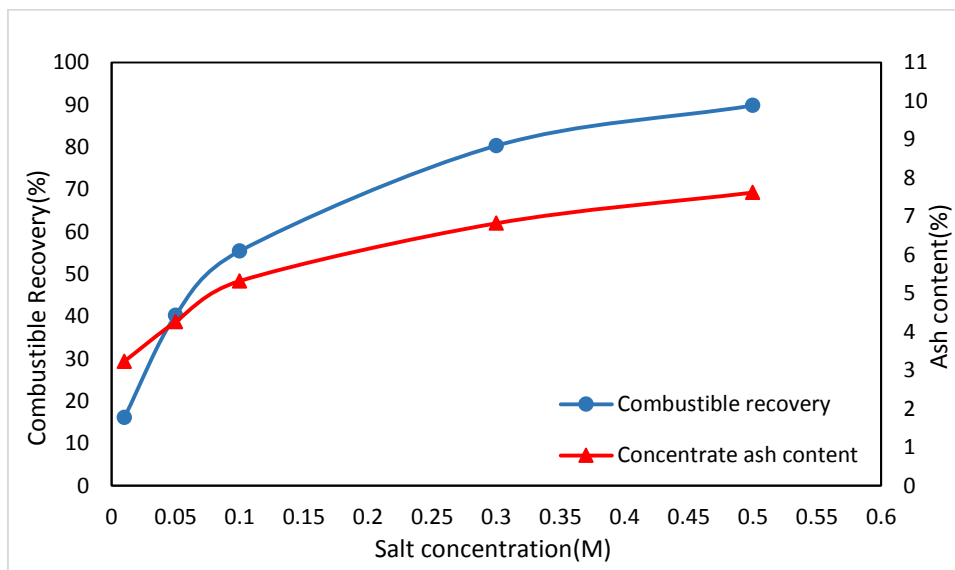
نشان داد که غلظت نمک تأثیر نقش مهمی را بازی می‌کند.

کلسیم کلرید تقریباً روندی مشابه با منیزیم کلرید نشان می‌دهد بطوریکه در غلظت ۰/۱ مولار نمک کلسیم کلرید بازیابی قابل احتراق ۷۹/۲۱ درصد با مقدار خاکستر ۵/۷۵ درصد به دست آمد. افزایش غلظت نمک از ۰/۰۱ به ۰/۳ و ۰/۵ مولار بازیابی قابل احتراق را از ۱۶/۸۳ به ۸۷/۱۳ و در نهایت به ۹۲/۳۹ درصد می‌رساند.



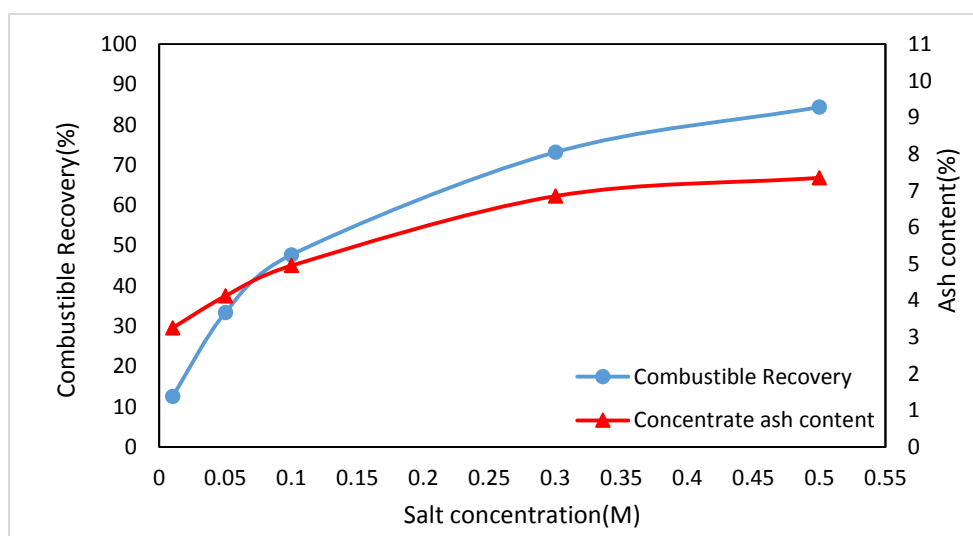
شکل ۳-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی  $\text{CaCl}_2$

شکل ۴-۴: فلوتاسیون زغال سنگ را در حضور سدیم کلرید را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی  $\text{NaCl}$

نتایج به دست آمده از فلوتاسیون زغال سنگ در حضور نمک سدیم کلرید نشان داد که محصول زغال سنگ با درصد خاکستر ۳/۲۳ درصد با بازیابی ۱۶/۰۷ درصد در غلظت ۰/۰۱ مولار نمک به دست آمد. با افزایش غلظت نمک، بازیابی قابل احتراق از ۵۵/۴۵ به ۸۹/۸۴ درصد در غلظت ۰/۱ مولار به ۰/۵ مولار رسید. همچنین مقدار خاکستر کنسانتره در غلظت ۰/۱ مولار به ۰/۵، از ۵/۳۲ به ۷/۶۲ افزایش یافته است. در نهایت نتایج به دست آمده از تأثیر پتاسیم کلرید بر فلوتاسیون زغال سنگ در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



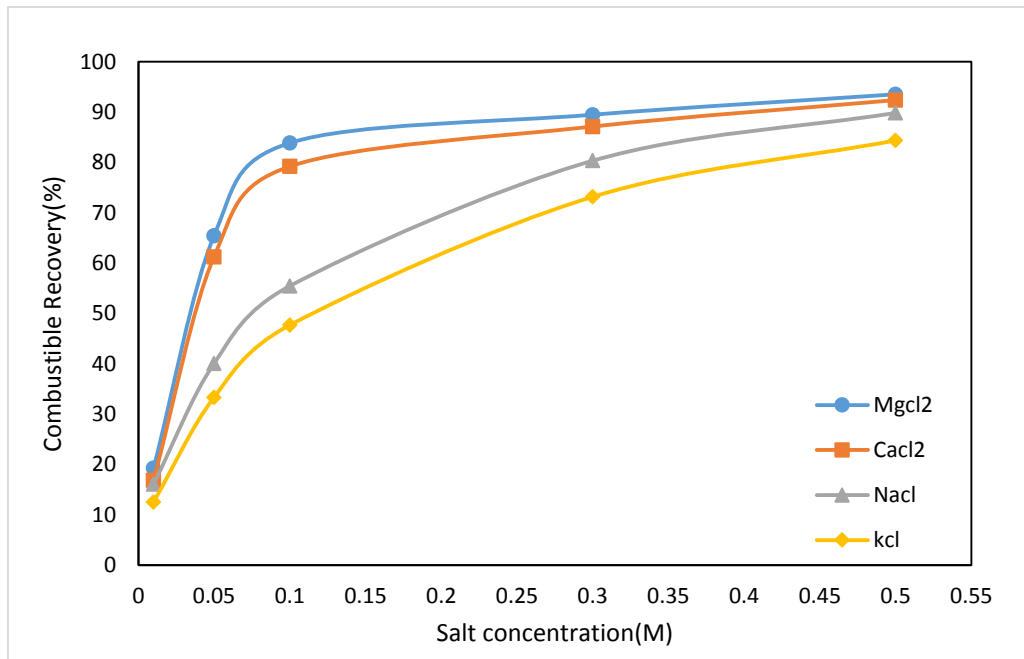
شکل ۴-۵: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی KCl

با افزایش غلظت پتاسیم کلرید بازیابی قابل احتراق زغال سنگ افزایش یافته است. به عنوان مثال در غلظت ۰/۱ مولار بازیابی ۴۷/۶۸ درصد بوده است که در غلظت ۰/۵ مولار بازیابی به ۸۴/۳۶ درصد رسیده است. همانند نتایج قبلی نمک پتاسیم کلرید تأثیر قابل توجهی بر مقدار بازیابی از خود نشان دادند که مقدار بازیابی با توجه به ظرفیت کاتیون ها به دست آمده برای هر نمک متفاوت بود.

شکل ۴-۶ نتایج بازیابی قابل احتراق را برای نمک های مختلف کلرید به عنوان تابعی از غلظت نمک نشان داده است. در نگاه کلی، تمام نمک های معدنی استفاده شده در این نمودار بازیابی قابل احتراق را افزایش داده اند که مقدار بازیابی برای هر نمک متفاوت است. نتایج به دست آمده از شکل ۴-۶ نشان می دهد که منیزیم کلرید بیشترین و پتاسیم کلرید کمترین مقدار بازیابی قابل احتراق را نشان دادند.



با توجه به اینکه در نمک‌های کلرید، آنیون  $Cl^-$  در تمام نمک‌های کلرید استفاده شده است، پس افزایش مقدار بازیابی زغال سنگ را برای نمک‌های مختلف نمی‌توان به تأثیر زیاد آنیون  $Cl^-$  مرتبط دانست.



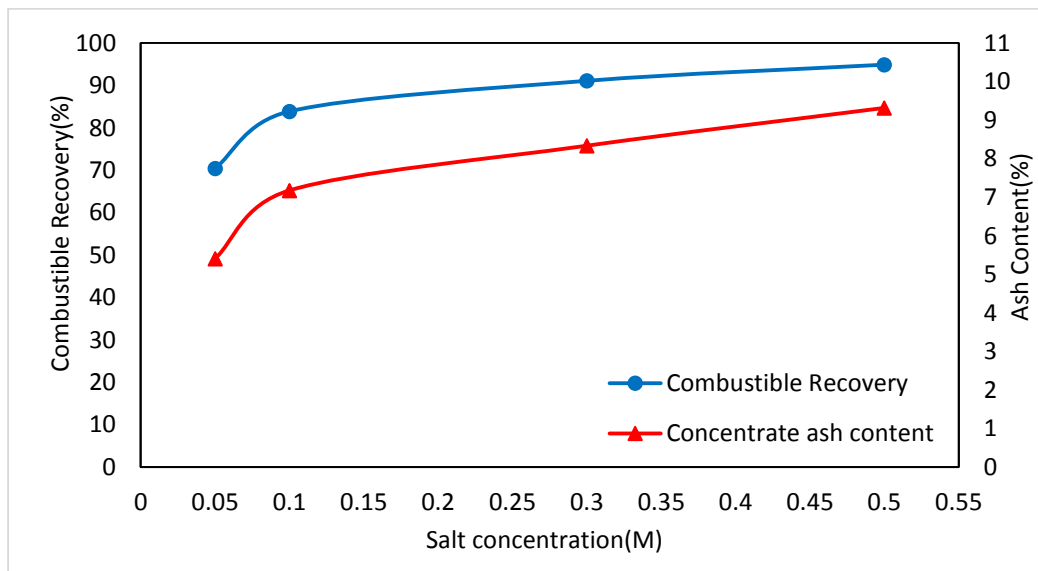
شکل ۴-۶: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی کلرید

با توجه به مطالعات (Zhang., 2014) کاتیون‌های سه‌ظرفیتی تأثیر قوی‌تری نسبت به کاتیون‌های دیگر بر بار سطحی ذرات زغال سنگ دارند که این با مشاهدات ما مطابقت دارد بطوریکه در نمک‌های کلرید، نمک‌های منیزیم کلرید و کلسیم کلرید با کاتیون دو ظرفیتی تأثیرشان نسبت به سدیم کلرید و پتاسیم کلرید بیشتر است و بنابراین بازیابی برای کاتیون‌های با ظرفیت بالا بیشتر است.

۴-۲-۱-۲-۲ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور نمک‌های نیتراته بدون کلکتور و کف‌ساز فلوتاسیون زغال سنگ در حضور نمک‌های آلومینیوم نیترات و منیزیم نیترات بدون اضافه کردن معرف‌های شیمیایی انجام شد.

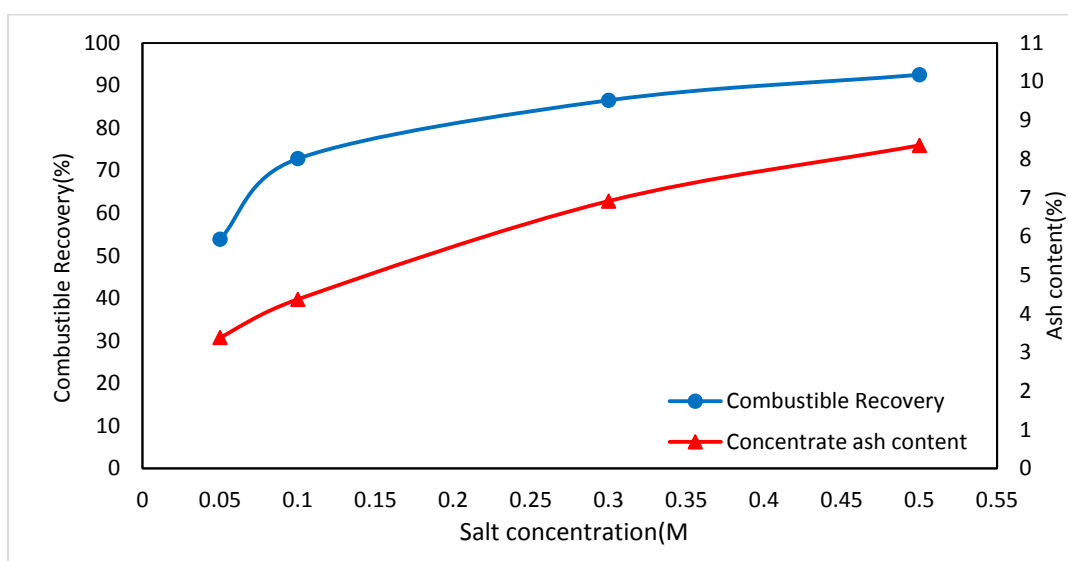
تأثیر نمک آلومینیوم نیترات بر بازیابی قابل احتراق به‌عنوان تابعی از غلظت نمک در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش در غلظت نمک، بازیابی قابل احتراق روند صعودی داشته و در غلظت ۰/۵ مولار مقدار بازیابی به ۹۴/۹۲ رسیده است. علاوه برافزایش بازیابی،

مقدار خاکستر محصولات از ۵/۴۱ درصد در غلظت ۰/۰۵ مولار به ۹/۳۲ درصد در غلظت ۰/۵ مولار رسیده است. بیشترین مقدار بازیابی در غلظت ۰/۵ مولار ۹۴/۹۲ درصد است.



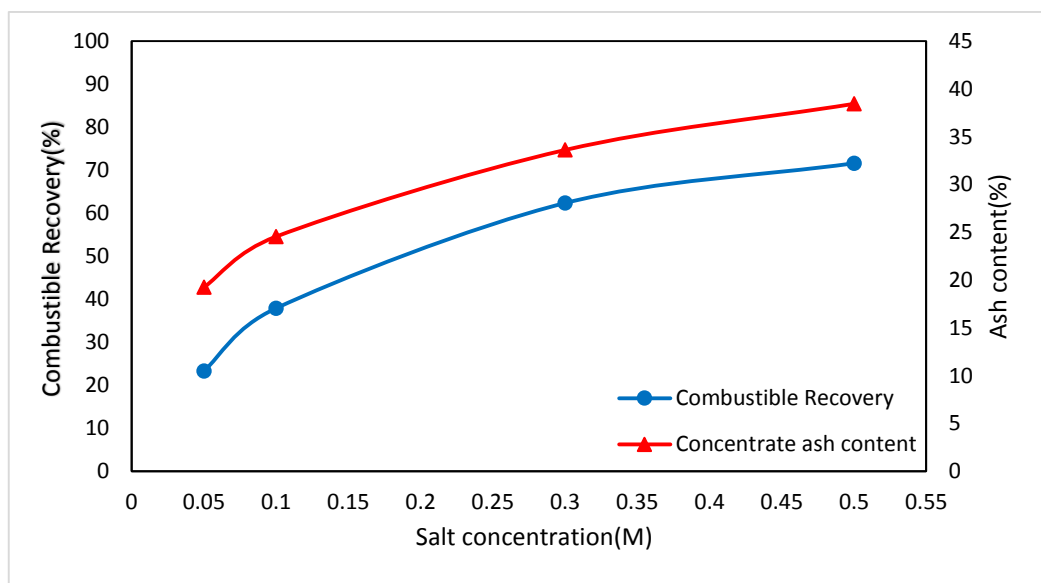
شکل ۴-۷: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی  $Al(NO_3)_3$

همچنین تأثیر نمک منیزیم نیترات بر مقدار بازیابی قابل احتراق در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از این شکل نشان می دهد که بازیابی قابل احتراق روند افزایشی داشته است و این مقدار بازیابی در غلظت ۰/۵ مولار منیزیم نیترات به ۹۲/۵۰ می رساند که تقریباً مشابه با بازیابی قابل احتراق منیزیم کلرید و کلسیم کلرید است با توجه به اینکه کاتیون های مشابه هستند.



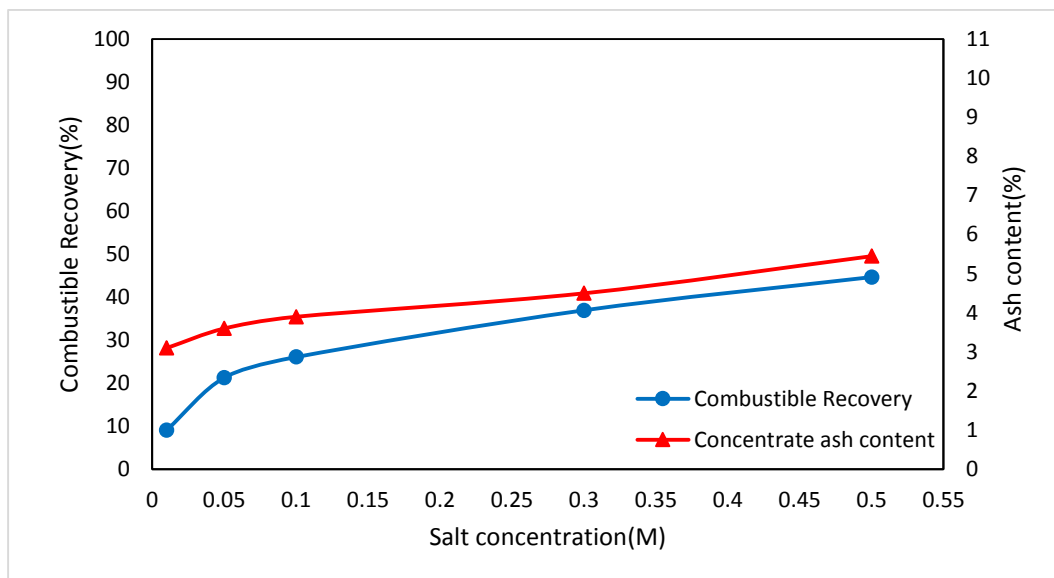
شکل ۴-۸: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی  $Mg(NO_3)_2$

۴-۲-۱-۲-۳-۳ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی پتاسیم یدید بدون کلکتور و کف ساز شکل ۴-۹ تأثیر افزودن غلظت نمک را بر فلوتاسیون زغال سنگ نشان می دهد. در این آزمایش از خوراکی با درصد خاکستر بالا (۴۳/۶) استفاده شد. نتایج به دست آمده از شکل ۴-۸ نشان می دهد که در صد خاکستر بالا همانند خاکستر پایین با افزایش غلظت نمک بازیابی روند افزایشی داشته است. با افزایش غلظت نمک از ۰/۰۵ مولار با مقدار خاکستر ۱۹/۲۵ به ۰/۵ مولار با مقدار خاکستر ۳۸/۴۵، مقدار بازیابی از ۲۳/۳۳ درصد به ۷۱/۶۳ درصد رسیده است.



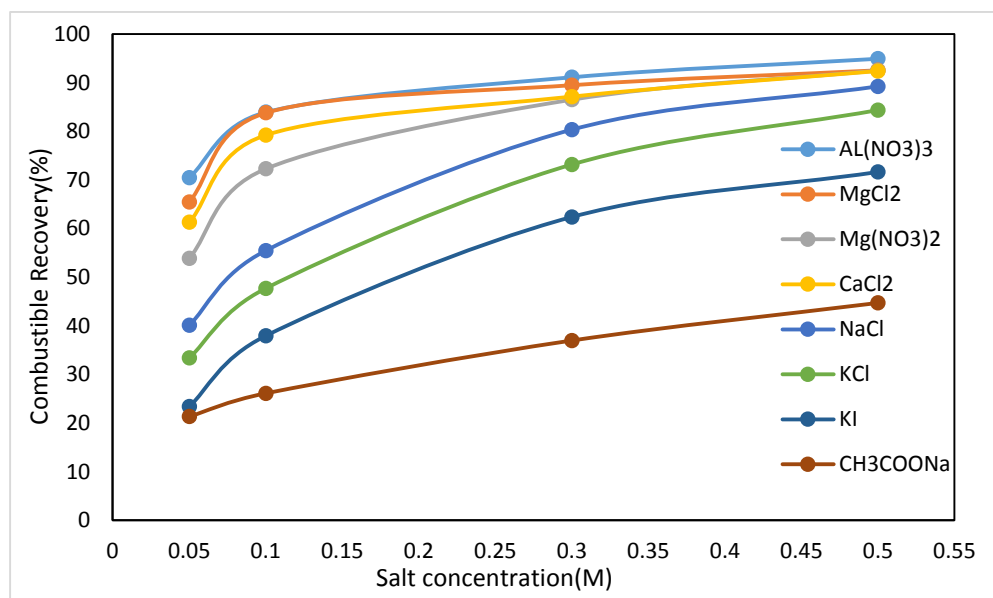
شکل ۴-۹: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی KI

۴-۲-۱-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی استات بدون کلکتور و کف ساز شکل ۴-۱۰ تأثیر افزودن نمک استات سدیم را بر بازیابی زغال سنگ نشان می دهد. همان طور که در شکل ۴-۹ دیده می شود با افزایش غلظت نمک بازیابی قابل احتراق زغال سنگ افزایش یافته است اما این مقدار بازیابی بانمک های دیگر خیلی کمتر است بطوریکه در بالاترین غلظت نمک یعنی ۰/۵ مولار نمک مقدار بازیابی قابل احتراق به ۴۴/۶۹ رسیده است و نسبت به نمک های دیگر کمترین مقدار بازیابی را نشان می دهد که این به دلیل این است که از همبستگی حباب ها جلوگیری نمی کند و حباب های بزرگ و ناپایدار تولید می شود که پایداری کف را کاهش می دهد.



شکل ۴-۱۰: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی  $\text{CH}_3\text{COONa}$

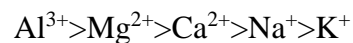
۵-۲-۱-۲-۴ مقایسه تأثیر نمک‌های مختلف بر فلوتاسیون زغال سنگ بدون کلکتور و کفساز  
 شکل ۴-۱۱ تأثیر نمک‌های مختلف بر بازیابی قابل احتراق زغال سنگ را به‌عنوان تابعی از غلظت نمک نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف

نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۴-۱۱ نشان می‌دهد که تحت این شرایط محصول زغال سنگ می‌تواند در محلول‌های نمکی بدون استفاده از کلکتور و کفساز بازیابی شود. بازیابی زغال سنگ با افزایش غلظت

نمک افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های محققان دیگر که فلوتاسیون کانی‌های آبران طبیعی به‌طور قابل توجه با افزودن نمک‌های معدنی افزایش می‌یابد مطابقت دارد (Yoon and Sabey 1989; Li and Somasundaran 1993; Kurniawan et al 2011). همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که تأثیر نمک بر بازیابی زغال‌سنگ بستگی به نوع و غلظت نمک دارد بطوریکه آلومینیوم نیترات بهترین عملکرد بازیابی فلوتاسیون و استات سدیم کمترین مقدار را نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش با مطالعات (Zhang., 2014) که کاتیون‌های سه‌ظرفیتی تأثیر قوی‌تری بر فلوتاسیون زغال نسبت به دیگر کاتیون‌ها دارد مطابقت دارد بطوریکه یون  $Al^{3+}$  تأثیر قوی‌تری نسبت به سایر کاتیون‌ها از خود نشان داد. همچنین می‌توان تأثیر کاتیون‌های مختلف را این‌گونه نوشت:



افزایش قابل توجه در بازیابی قابل احتراق نشان‌دهنده این است که ذرات زغال‌سنگ بیشتری با افزودن محلول نمکی بازیابی شدند. این پدیده مرتبط با افزایش پایداری کف و تجمع ذرات در محلول‌های نمکی است.

۲-۲-۴ فلوتاسیون زغال‌سنگ در حضور محلول نمکی با درصد خاکستر بالا

در این مرحله برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از خوراکی با خاکستر ۴۳/۶٪ استفاده شد. در این آزمایش‌ها، تأثیر نمک‌های معدنی با خاکستر بالا، تأثیر هم‌زمان نمک و کلکتور، تأثیر هم‌زمان نمک و کفساز و تأثیر برهم‌کنش نمک‌ها باهم دیگر بر فلوتاسیون زغال‌سنگ بررسی شد و نتایج آن‌ها با فلوتاسیون معمولی (حضور معرف‌های شیمیایی) مقایسه شد.

جدول ۳-۴: نتایج فلوتاسیون زغال‌سنگ در حضور معرف‌های شیمیایی

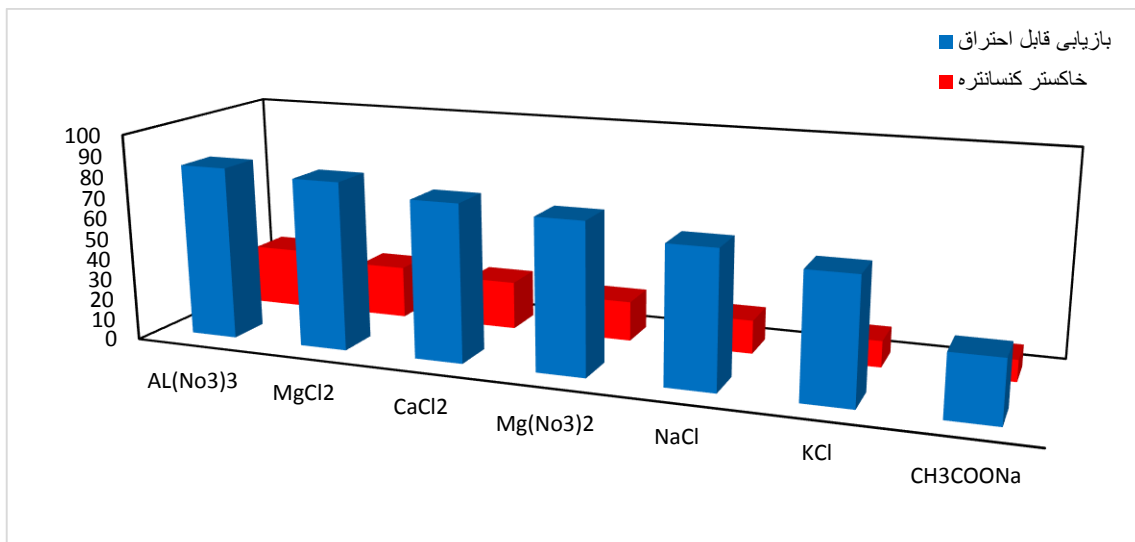
خاکستر کنسانتره	بازیابی قابل احتراق	کفساز (گرم بر تن)	کلکتور (گرم بر تن)
۲۹/۵۴	۸۷/۶۵	۱۵۰	۱۵۰۰

جدول ۴-۴: نتایج فلوتاسیون و میزان خاکستر برای نمک‌های با غلظت مختلف

نام نمک	غلظت نمک (مولار)	کلکتور (گرم برتن)	کف‌ساز (گرم برتن)	خاکستر خوراک (%)	خاکستر کنسانتره (%)	خاکستر باطله (%)	بازیابی وزنی (%)	بازیابی قابل احتراق (%)
AL(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	۰/۱	-	-	۴۳/۶	۲۹/۲۷	۴۹/۲۱	۲۸/۲۰	۸۳/۵۴
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	۰/۱	-	-	۴۳/۶	۱۹/۲۵	۵۸/۲۲	۱۵۷	۷۲/۴۵
MgCl <sub>2</sub>	۰/۱	-	-	۴۳/۶	۲۵/۳۶	۶۴/۹۳	۵۳/۹۶	۷۵/۰۹
		۱۵۰۰	-	۴۳/۶	۲۸/۶۵	۵۱/۵۵	۶۶/۲۴	۸۳
		-	۱۵۰	۴۳/۶	۳۴/۱۵	۷۷/۳۵	۷۸/۱۸	۸۷/۵۴
CaCl <sub>2</sub>	۰/۱	-	-	۴۳/۶	۲۳/۲۵	۶۹/۱۴	۵۵/۷۰	۷۲/۴۵
		۱۵۰۰	-	۴۳/۶	۲۴/۳۲	۷۵/۰۴	۶۲/۰۳	۷۸/۵۴
		-	۱۵۰	۴۳/۶	۲۹/۱۲	۷۱/۲۵	۶۵/۶۸	۸۲/۰۳
NaCl	۰/۱	-	-	۴۳/۶	۱۶/۱۸	۵۶/۴۴	۳۱/۹۴	۶۵/۴۵
		۱۵۰۰	-	۴۳/۶	۱۹/۵۳	۵۴/۴۱	۳۰/۸۵	۶۰/۵۲
		-	۱۵۰	۴۳/۶	۲۷/۴۵	۶۴/۵۴	۵۶/۵۱	۷۳/۴۵
KCl	۰/۱	-	-	۴۳/۶	۱۲/۷	۶۱/۵	۹	۵۹/۴۵
		۱۵۰۰	-	۴۳/۶	۱۹/۵۴	۵۹/۰۱	۳۶/۳۳	۵۲/۷۹
		-	۱۵۰	۴۳/۶	۱۹/۳۵	۶۲/۳۵	۴۳/۶۵	۶۹/۵۴
CH <sub>3</sub> COONa	۰/۱	-	-	۴۳/۶	۱۰/۴۵	۴۹/۶۷	۱۵/۵۳	۲۹/۹۶
		۱۵۰۰	-	۴۳/۶	۱۴/۸۲	۴۹/۶۹	۱۷/۵۲	۴۹/۳۸
		-	۱۵۰	۴۳/۶	۱۶/۴۵	۵۳/۱۵	۲۶/۰۸	۶۴/۳۲

#### ۱-۲-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف

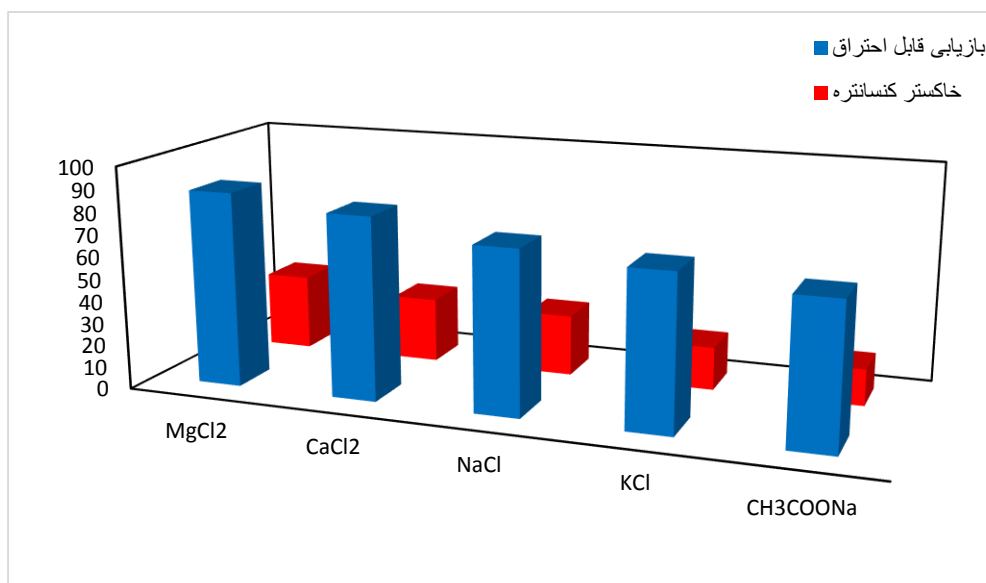
در انجام این آزمایش از محلول‌های نمکی مختلف با غلظت ثابت نمک (۰/۱ مولار) استفاده شد. شکل ۴-۱۲ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ را در حضور محلول‌های نمکی مختلف نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده روند مشابهی در مقدار بازیابی در مقایسه با محلول نمکی با خاکستر کم در غلظت ۰/۱ مولار نمک است با این تفاوت که مقدار بازیابی به دست آمده کمتر است که احتمالاً به این دلیل است که با افزایش مقدار خاکستر در خوراک، خاصیت آبرانی زغال سنگ کاهش می‌یابد و بازیابی کمتری رخ خواهد داد.



شکل ۴-۱۲: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف

#### ۲-۲-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف و کف‌ساز

شکل ۴-۱۳ نتایج فلوتاسیون زغال در محلول نمکی با غلظت ۰/۱ مولار و مقدار کف‌ساز ۱۵۰ گرم بر تن را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزودن کف‌ساز باعث تغییر در مقدار بازیابی شده است که این مقدار بازیابی برای بعضی از نمک‌ها تأثیر بیشتری داشته است. به عنوان مثال برای نمک استات سدیم در غیاب کف‌ساز بازیابی ۲۹/۸۶٪ است که با افزودن کف‌ساز مقدار بازیابی به ۶۴/۳۲٪ تغییر کرده است اما برای نمک‌های دیگر افزودن کف‌ساز تأثیر قابل توجهی بر بازیابی را نشان نمی‌دهد.



شکل ۴-۱۳: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف و کف ساز

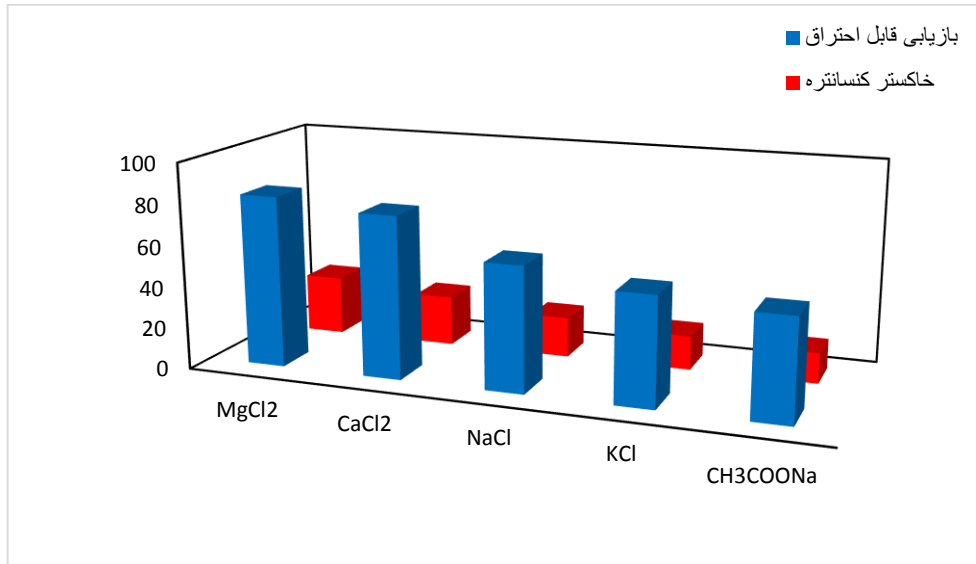
این رفتار در بازیابی زغال سنگ با افزودن کف ساز را می توان بر اساس غلظت گذار الکترولیت ها توضیح داد. در غلظت ۰/۱ مولار نمک های کلرید که بیشتر از غلظت گذار نمک ها است، افزودن کف ساز همبستگی حباب ها و اندازه حباب ها را در فاز پالپ به طور قابل توجهی کاهش نمی دهد. در مقایسه نمک استات سدیم غلظت گذار ندارد بنابراین افزودن کف ساز به پالپ همبستگی حباب ها و اندازه حباب ها را کاهش می دهد در نتیجه بازیابی فلوتاسیون برای نمک استات سدیم با افزودن کف ساز تغییر می کند.

۳-۲-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف و کلکتور با خاکستر متفاوت

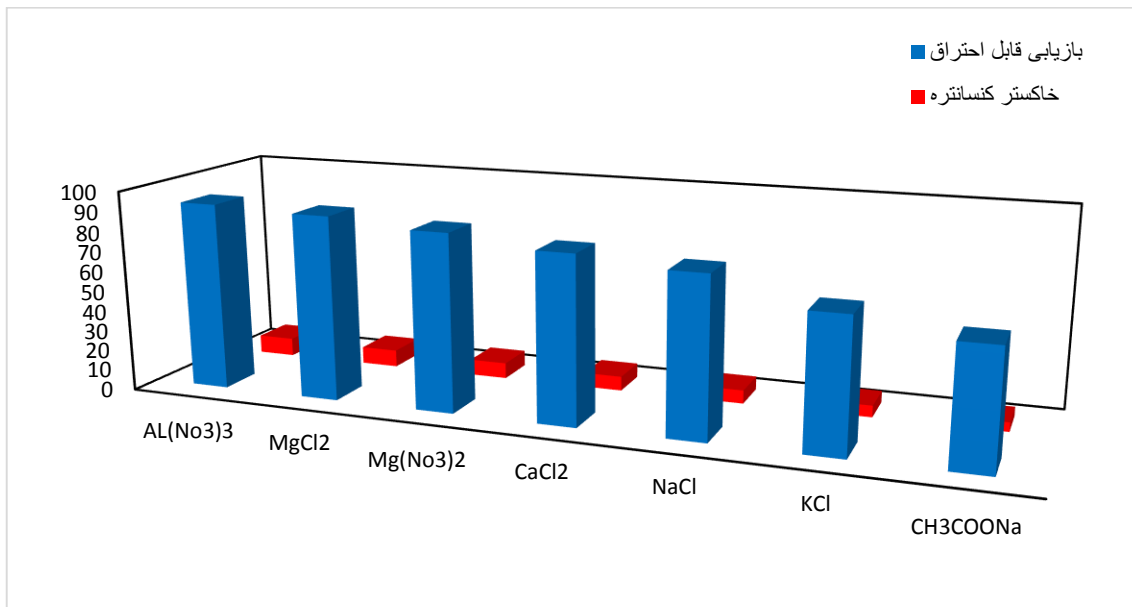
شکل ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ را در محلول نمکی ۰/۱ مولار و مقدار کلکتور ۱۵۰۰ گرم بر تن با دو خوراک با درصد خاکستر متفاوت (۴۳/۶-۱۰/۵) را نشان می دهد. مقایسه نتایج به دست آمده برای مقدار بازیابی نشان داد که محلول نمکی با کلکتور با درصد خاکستر کم (۱۰/۵) بازیابی بیشتری را نسبت به محلول نمکی با کلکتور با درصد خاکستر بالا (۴۳/۶) داشته است که این به دلیل تفاوت در مقدار خاکستر خوراک است. با افزایش در مقدار خاکستر خاصیت آبرانی زغال سنگ کاهش می یابد و اتصال ذره به حباب را مشکل می کند و مانع جذب ذره بر روی حباب می شود. همچنین افزایش بازیابی در حضور محلول نمکی با افزودن کلکتور را می توان به کاهش کشش سطحی نسبت داد. با افزایش غلظت نمک کشش سطحی افزایش می یابد (Weissenborn & Pugh., 1996). با این حال



افزودن کلکتور کشش سطحی را کاهش می‌دهد (Castro et al., 2012).



شکل ۴-۱۴: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف و کلکتور خاکستر بالا



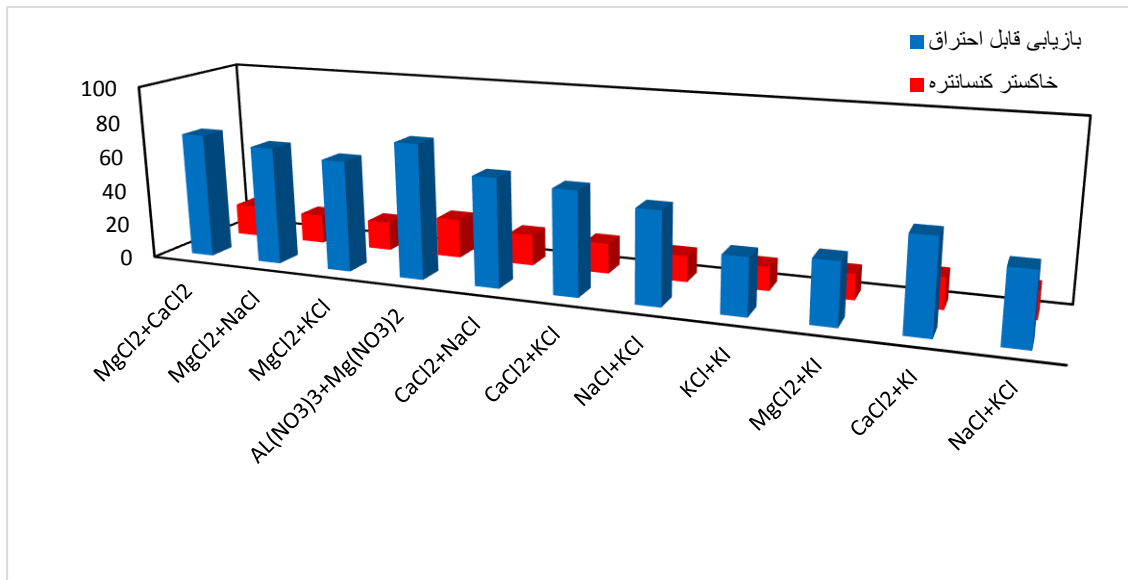
شکل ۴-۱۵: فلوتاسیون زغال سنگ در حضور محلول نمکی مختلف و کلکتور خاکستر پایین

۴-۲-۲-۴ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ در حضور برهم کنش نمک‌های معدنی

شکل ۴-۱۶ نتایج فلوتاسیون زغال سنگ را در حضور برهم کنش نمک‌های معدنی نشان می‌دهند.

این نتایج با آزمایش‌های قبلی که کاتیون‌های سه‌ظرفیتی و دو ظرفیتی تأثیر بیشتری نسبت به

کاتیون‌های یک ظرفیتی دارند مطابقت دارد. برای مثال ترکیب نمک آلومینیوم نیترات با منیزیم نیترات بازیابی ۷۶/۴۹٪ را نشان می‌دهد درحالی‌که ترکیب نمک پتاسیم یدید با پتاسیم کلرید بازیابی ۳۱/۹۴٪ را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶: فلوتاسیون زغال‌سنگ در حضور برهمکنش نمک‌های معدنی

#### ۴-۲-۲-۵ پایداری کف در حضور نمک‌های معدنی

ساختار کف و پایداری کف نقش مهمی در عیار کانی‌ها و بازیابی حاصل از عملیات فلوتاسیون تعیین می‌کند. همان‌طور که می‌دانیم یک کف پایدار تمایل به بازیابی بیشتری دارند زیرا ذرات کانی‌ها را برای مدت‌زمان طولانی باهم نگه می‌دارد. علاوه بر این، بازدهی فلوتاسیون نیز بستگی به توزیع اندازه حباب و درجه همبستگی حباب دارد، زیرا حباب‌های ریز معمولاً در جذب ذرات مؤثرتر هستند (Li & Somasundaran., 1991). بنابراین پایداری کف در ارتباط نزدیک با اندازه حباب‌ها است؛ یعنی: حباب‌های کوچک‌تر، کف پایدارتر.

افزودن کف‌ساز به سیستم فلوتاسیون اندازه حباب‌ها را کاهش و پایداری کف را افزایش می‌دهد. بنابراین وقتی که غلظت کف‌ساز افزایش پیدا کند، تنش سطحی کاهش می‌یابد و در نتیجه پایداری کف محلول افزایش می‌یابد. با این حال نمک‌های معدنی تأثیری متقابلی را نسبت به کف‌ساز نشان می‌دهد بطوریکه وقتی غلظت نمک افزایش پیدا می‌کند پایداری کف‌ها از طریق افزایش تنش سطحی افزایش

پیدا می‌کند. باین‌حال حضور نمک‌های معدنی ممکن است پتانسیل سطحی در فصل مشترک آب-هوا را افزایش دهد و از همبستگی حباب‌ها جلوگیری کند. در نتیجه حباب‌ها پایداری طولانی مدتی دارند و اندازه حباب‌ها کوچک باقی می‌ماند. افزایش بار حباب‌ها با افزایش غلظت نمک توسط دیبس<sup>۱</sup>، سیروس<sup>۲</sup> و بریدن<sup>۳</sup> گزارش شده است.

ماروکی و نیکودمو ۱۹۶۷ نشان دادند که وقتی غلظت الکترولیت‌ها افزایش پیدا می‌کند اندازه حباب‌ها کوچک‌تر می‌شود که توسط پارامتر  $G$  که در ارتباط نزدیکی با پتانسیل سطح دارد توضیح داد

$$G=1.2ZC\left(\frac{dY}{dC}\right)\left(1+\frac{d\ln f}{d\ln c}\right)^{-1} \quad (۴-۱)$$

$Z$  = ظرفیت الکترولیت‌ها

$C$  = غلظت الکترولیت‌ها

$Y$  = تنش سطحی

$f$  = میانگین ضریب فعالیت الکترولیت‌ها

آن‌ها متوجه شدند که اندازه حباب‌ها با افزایش پتانسیل سطحی  $G$  کاهش می‌یابد که  $G$  می‌تواند مثبت یا منفی باشد همچنین اندازه حباب‌ها با افزایش  $\frac{dY}{dC}$  کاهش می‌یابد در حالی که پایداری کف افزایش می‌یابد. بنابراین پایداری کف ممکن است نه تنها به کاهش تنش سطحی بلکه به مقدار بار در تنش سطحی بستگی دارد. همچنین این معادله نشان می‌دهد که  $G$  رابطه مستقیمی با  $Y$  دارد که پایداری کف باید با افزایش تنش سطحی افزایش یابد که مقدار پایداری کف برای کاتیون‌های سه‌ظرفیتی نسبت به کاتیون‌های دو ظرفیتی و تک‌ظرفیتی بیشتر است (Yoon and sabey., 1989).

با توجه به گفته‌های بالا می‌توان نتیجه گرفت که نمک‌های معدنی اندازه حباب‌ها را با افزایش تنش سطحی و پتانسیل سطحی در فصل مشترک آب-هوا، کوچک‌تر و کف را پایدارتر می‌کنند.

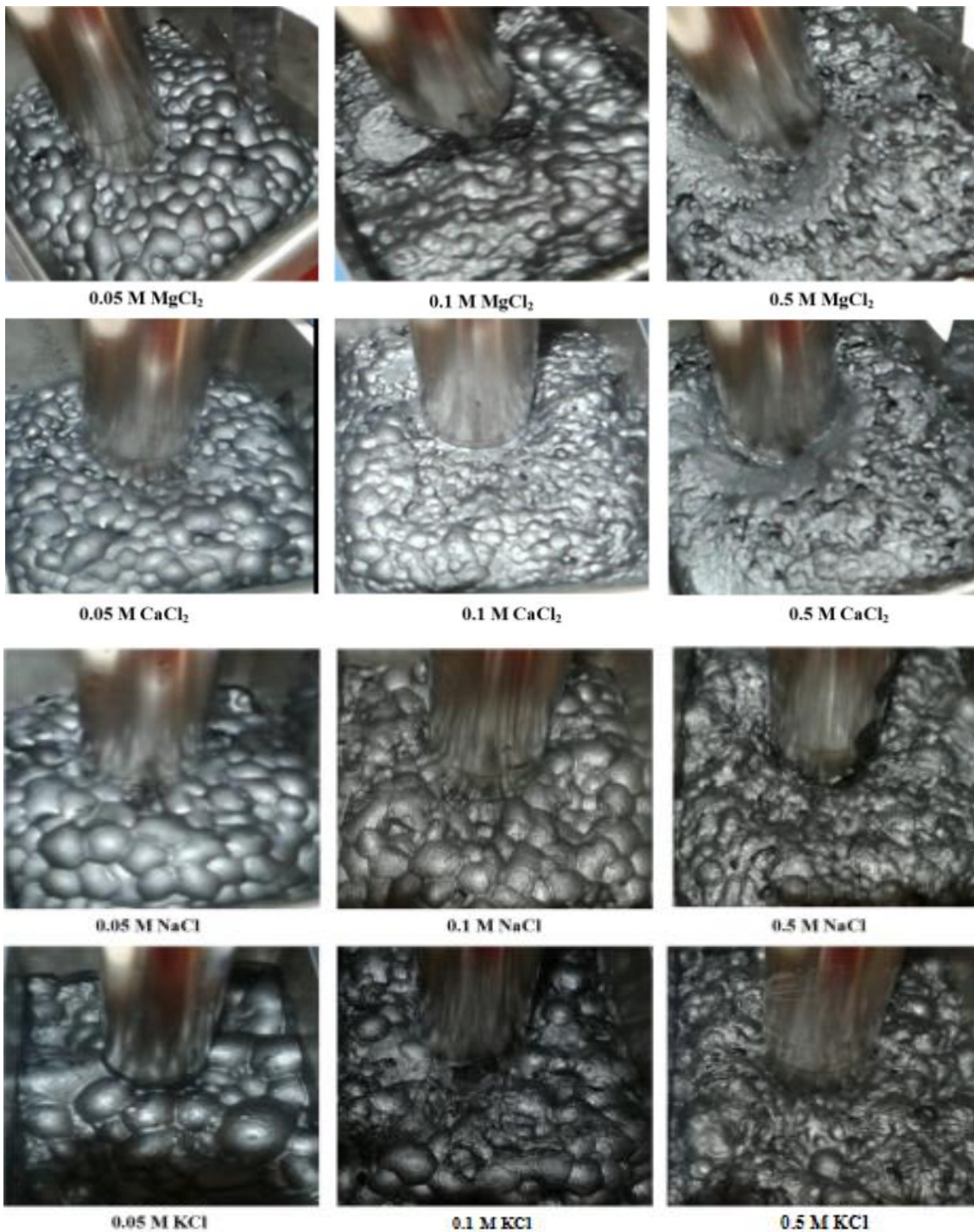
شکل ۴-۱۷ و ۴-۱۸ تصویری از حباب‌ها در محلول‌های نمکی مختلف و در غلظت‌های مختلف را

<sup>۱</sup>Dibbs

<sup>۲</sup>Sirois

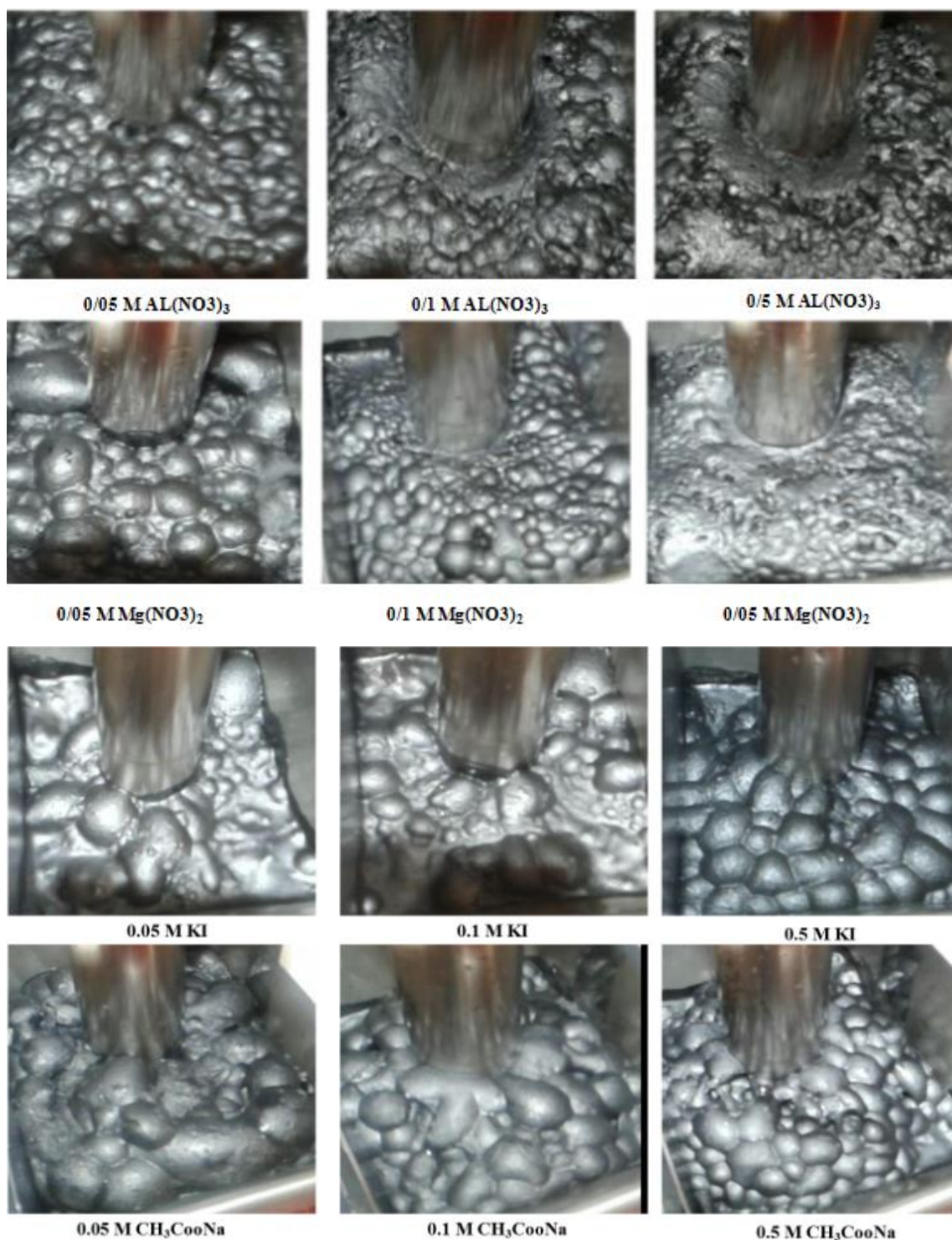
<sup>۳</sup>Breden

نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷ تأثیر انواع نمک‌ها بر توزیع اندازه حباب‌ها

افزایش غلظت نمک، منجر به تولید حباب‌های ریز فراوانی بویژه در غلظت بالای نمک می‌شود که این تغییرات اندازه حباب‌ها برای نمک‌های مختلف و در غلظت‌های بالا متفاوت است.



شکل ۴-۱۸ تأثیر نمک‌های مختلف بر توزیع اندازه حباب‌ها

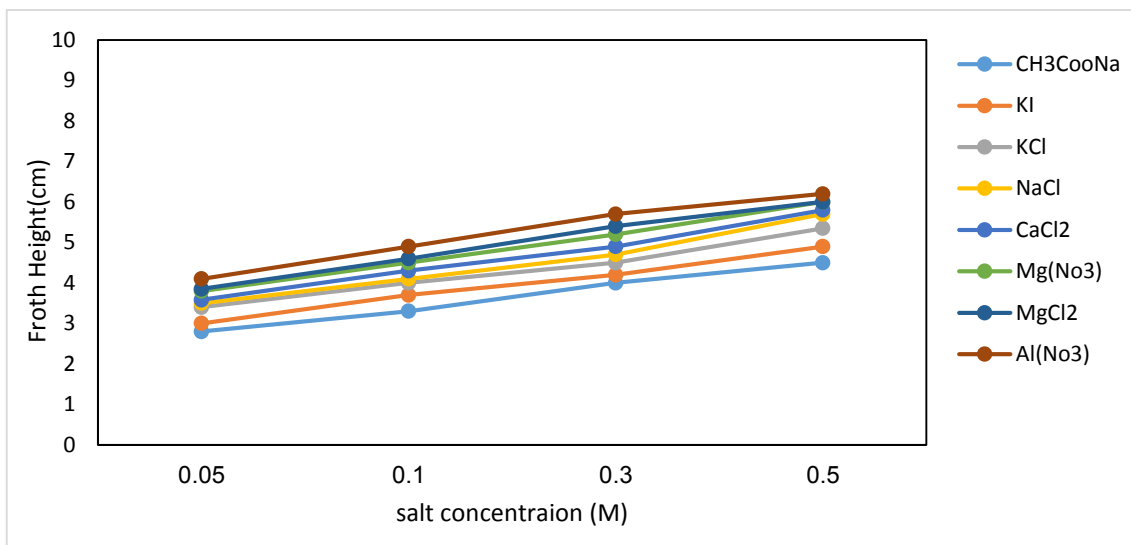
نتایج به دست آمده از شکل ۴-۱۷ و ۴-۱۸ نشان می‌دهد که نمک‌های معدنی منجر به تولید حباب‌های کوچک‌تر و پایدارتر و در نتیجه بازیابی بیشتری می‌شوند همچنین اندازه حباب‌ها به یک حد مجاز رسیده است، پس از آن اندازه حباب‌ها ثابت باقی می‌ماند. این رفتار به مفهومی به نام غلظت گذار



یا انتقال مربوط می‌شود که معادل با غلظت ادغام یا همبستگی بحرانی ایجاد شده برای کف‌سازها می‌باشد. تصویر به‌دست‌آمده از حباب‌ها در محلول‌های نمکی مختلف نشان داد که اندازه حباب‌ها برای نمک‌های مختلف متفاوت است. به‌عنوان مثال برای محلول نمکی استات سدیم، با افزایش غلظت نمک اندازه حباب‌ها تغییر چندانی نکرده است که به این دلیل است که غلظت گذار ندارد و بازیابی را به‌آرامی افزایش می‌دهد اما برای محلول نمکی آلومینیوم نیترات و نمک‌های کلرید با افزایش غلظت نمک، اندازه حباب‌ها کوچک‌تر و پایدارتر شده است که این منجر به بازیابی بیشتر این محلول‌های نمکی نسبت به محلول نمکی استات سدیم است. همچنین باید اشاره کرد که برای تست‌های فلوتاسیون در محلول نمکی پتاسیم یدید از خوراکی با درصد خاکستر بالا  $43/6\%$  استفاده شده است که تصویر کف‌ها نشان از تأثیر خاکستر بالا در محلول نمکی است. همچنین با افزایش غلظت نمک همبستگی یا ادغام حباب‌ها کاهش می‌یابد. حباب‌های کوچک‌تر نه‌تنها پایداری کف را بلکه سینتیک فلوتاسیون را در محل تماس ذرات-حباب افزایش می‌دهد (Ahmed and Jameson. 1985; Gorain et al., 1998).

شکل ۴-۱۹ ارتفاع کف را به‌عنوان تابعی از غلظت نمک در مدت‌زمان ۱۰ ثانیه برای نمک‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نمک ارتفاع کف افزایش می‌یابد که برای نمک‌های مختلف متفاوت است.

همانطور که می‌دانیم حباب‌های کوچک‌تر معمولاً در نگه‌داشتن ذرات مؤثرتر هستند. حباب‌های کوچک‌تر نسبت به حباب‌های بزرگ‌تر سطح مخصوص بیشتری دارند و همچنین احتمال ترکیدن حباب‌های آن‌ها در هنگام بالا رفتن کمتر است. افزایش غلظت نمک منجر به تولید حباب‌های کوچک‌تر و پایدارتر می‌شوند که این حباب‌ها در هنگام صعود به‌طرف بالا و انتقال از فاز پالپ به فاز کف با ذرات زغال‌سنگ بیشتری برخورد می‌کند و ذرات بیشتری را به فاز کف انتقال می‌دهد و در نتیجه پایداری کف و عملکرد فلوتاسیون را بهبود می‌بخشد.



شکل ۴-۱۹: تأثیر غلظت نمک بر ارتفاع کف

نمک‌های آلومینیوم نیترات و منیزیم کلرید بیشترین ارتفاع کف درحالی‌که نمک‌های پتاسیم یدید و استات سدیم کمترین ارتفاع کف را نشان دادند به این دلیل که در غلظت کم محلول استات سدیم، اندازه حباب‌ها بزرگ و ناپایدار است و این حباب‌ها در هنگام حرکت به سمت بالا می‌ترکند. با افزایش غلظت نمک به ۰/۵ مولار تغییر چندانی در اندازه حباب‌ها پیدا نشد که به دلیل این است که غلظت گذار ندارد. با افزایش ارتفاع کف نرخ سقوط (فروپاشی) کف کاهش و چسبندگی ذرات به حباب‌ها افزایش می‌یابد که این دلیل اصلی برای افزایش قابل توجه بازیابی قابل احتراق است. باید به این نکته اشاره کرد که ارتفاع کف نباید نه‌چندان زیاد باشد که زمان رسیدن ذرات از فاز پالپ به فاز کف طولانی شود چون اگر ارتفاع کف بیش از حد زیاد باشد ذرات چسبیده به حباب ممکن به علت زمان طولانی رسیدن به فاز کف جدا شوند همچنین حباب ممکن است ذرات بیشتری به آن بچسبند و سنگین‌تر شود و در نتیجه نتواند به بالا برسند. اندازه حباب‌های خیلی کوچک تأثیر بدی دارند زیرا ممکن است توانایی حمل ذرات به بالا را نداشته باشد. همچنین مشاهده شد که با افزایش زمان فلوتاسیون ارتفاع کف بیشتر شد. در این مطالعه آلومینیوم نیترات و نمک‌های کلرید بیشترین تأثیر و استات سدیم کمترین تأثیر را نسب به دیگر نمک‌ها در بازیابی و همچنین تولید حباب‌های کوچک و ادغام حباب‌ها داشته است. افزایش بازیابی فلوتاسیون را می‌توان به افزایش احتمال برخورد ذرات زغال‌سنگ با حباب، تولید

حباب‌های کوچک‌تر و غیر پیوسته به هم و افزایش پایداری کف مرتبط دانست.

جلوگیری از همبستگی یا ادغام حباب‌ها یک فاکتور مهم در فرایند فلوتاسیون است زیرا اندازه حباب‌ها و پایداری کف را تعیین می‌کند. همبستگی یا ادغام فرآیندی است که حباب‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند و یک حباب جدید تکی تشکیل می‌شود. برخی از نمک‌ها تأثیر مثبتی را بر جلوگیری از همبستگی حباب‌ها نشان دادند درحالی‌که برخی دیگر تأثیری برای جلوگیری از همبستگی حباب‌ها نداشتند. با افزایش غلظت الکترولیت‌ها، اندازه حباب‌ها کاهش می‌یابد و از همبستگی حباب‌ها کاسته می‌شود در نتیجه پایداری کف افزایش می‌یابد (Ozdemir, 2013; Marrucciand & Nicodemo 1967).

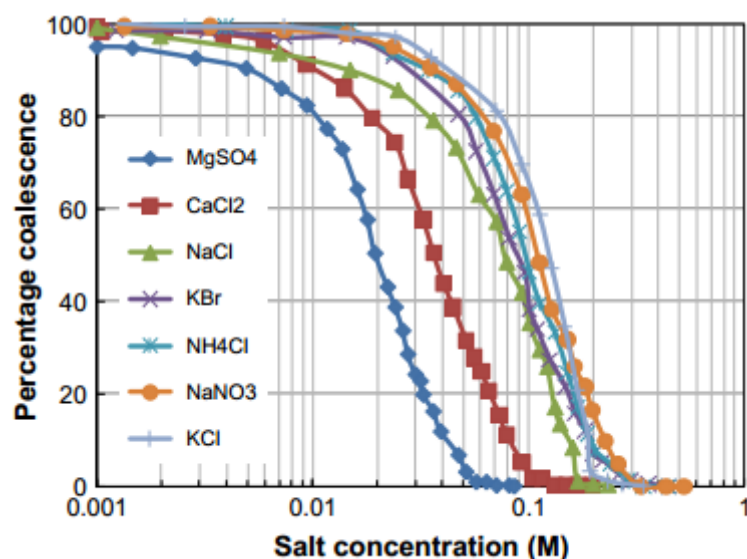
باین حال بازیابی زغال در حضور نمک‌های معدنی که حباب‌های ریز فراوانی تولید می‌کند بهبود می‌یابد. این نتایج نشان داد که نوع و غلظت محلول نمکی به‌طور قابل‌توجهی بر خواص کف تأثیر می‌گذارد. این پدیده با یافته‌های قبلی مطابقت دارد (Kurniawan, 2011; Craig et al., 1993).

افزایش بازیابی فلوتاسیون از استات سدیم به آلومینیوم نترات را می‌توان به کاهش همبستگی حباب‌ها مرتبط دانست. با افزایش در غلظت الکترولیت‌ها، قدرت یونی افزایش و اندازه متوسط حباب‌ها کاهش می‌یابد همچنین الکترولیت‌ها نیروی دافعه را در سطح حباب به دلیل تغییر بار الکترواستاتیک بر حباب‌ها افزایش می‌دهند که از همبستگی حباب‌ها جلوگیری و حباب‌های پایدارتری تولید می‌کنند.

مطالعات کریگ و همکاران نشان داده‌شده است که یک ارتباط معینی بین ظرفیت الکترولیت‌ها و غلظت گذار (انتقال) وجود دارد که در آن همبستگی حباب‌ها ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

درصد همبستگی حباب‌ها در مقابل غلظت نمک‌های مختلف در شکل ۴-۲۰ نشان داده‌شده است. نتایج نشان داد که درصد همبستگی حباب‌ها با افزایش غلظت نمک‌های معدنی کاهش می‌یابد و این کاهش همبستگی برای نمک‌های مختلف در غلظت‌های مختلف متفاوت است بطوریکه کاتیون‌های دو ظرفیتی تأثیر بیشتری نسبت به کاتیون‌های تک‌ظرفیتی داشته است و در غلظت‌های نمک پایین‌تر از کاتیون‌های تک‌ظرفیتی از همبستگی حباب‌ها جلوگیری می‌کند. با توجه به این مطالعه از همبستگی حباب‌ها در حضور نمک‌های معدنی کاسته شد.





شکل ۴-۲۰: درصد همبستگی به عنوان تابعی از غلظت نمک الکترولیت‌های مختلف (Craig et al., 1993)

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، نتایج آزمایش‌های انواع الکترولیت‌ها و غلظت‌های مختلف بر روی همبستگی حباب نشان می‌دهد که یک غلظت انتقال وجود دارد. غلظت گذار برای نمک‌های مختلف متفاوت است. غلظت گذار برای منیزیم کلرید و کلسیم کلرید، سدیم کلرید، پتاسیم کلرید به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۰۸ و ۰/۲ است (Craig et al. 1993a; Craig et al. 1993b). وقتی که غلظت نمک بیشتر از غلظت گذار آن نمک باشد بویژه در غلظت بالای نمک، از همبستگی یا ادغام حباب‌ها کاسته و یا جلوگیری می‌شود همچنین در غلظت نمک بیشتر از غلظت گذار، نیروی جاذبه برهم‌کنش بین حباب‌ها کاهش می‌یابد که به نظر می‌رسد نمک‌ها با کاهش جاذبه بین حباب‌ها از همبستگی حباب‌ها جلوگیری می‌کنند.

یون‌های چند ظرفیتی چون تأثیر بیشتری بر پتانسیل بار حباب‌ها دارند، غلظت گذار کمتری نسبت به یون‌های تک‌ظرفیتی دارند (Zieminski, S. A., & Whittemore, R. C. 1971). به عنوان مثال برای نمک‌های منیزیم کلرید و کلسیم کلرید وقتی که غلظت نمک ۰/۰۱ مولار و کمتر از غلظت گذار (۰/۰۲) آن نمک است تأثیر قابل توجهی در بازیابی فلوتاسیون دیده نمی‌شود اما با افزایش غلظت نمک به ۰/۱ یا ۰/۵ مولار که بیشتر از غلظت گذار نمک است همبستگی حباب‌ها کاهش و نهایتاً جلوگیری می‌شود و بازیابی فلوتاسیون بهبود می‌یابد. نمک‌های منیزیم کلرید و کلسیم کلرید همچنین آلومینیوم نترات

روند تقریباً یکسانی را در مقدار بازیابی نشان می‌دهد که احتمالاً به این دلیل است که غلظت گذار این نمک‌ها نزدیک به هم است. به‌عنوان مثال غلظت گذار منیزیم کلرید و کلسیم کلرید یکسان و ۰/۰۲ است که این نمک‌ها روند تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند. بعضی از نمک‌ها مانند استات سدیم غلظت گذار ندارند و در نتیجه بازیابی را به آرامی افزایش می‌دهد هرچند که نسبت به نمک‌های دیگر مقدار بازیابی ناچیزی داشت. همچنین شکل ۴-۱۸ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نمک استات سدیم، تأثیر چندانی بر اندازه حباب‌ها ایجاد نشده است.

یون‌های نمکی به‌تنهایی تأثیری بر همبستگی حباب‌ها ندارند بلکه این ترکیب جفت‌های آنیونی و کاتیونی است که بر رفتار همبستگی حباب‌ها در محلول نمکی تأثیر می‌گذارند. کریگ و همکاران پیشنهاد کردند که ترکیب یون‌ها در محلول برای کنترل تأثیر همبستگی خارق‌العاده است.

جدول ۴-۵ برخی از ترکیبات آنیونی و کاتیونی را نشان می‌دهد که یک قانون ترکیبی برای یون‌های موجود در محلول‌های الکترولیتی وجود دارد که بر روی همبستگی حباب تأثیر می‌گذارند. با اختصاص یک "ویژگی" ( $\alpha$  یا  $\beta$  به هر آنیون یا کاتیون)، رفتار همبستگی نمک ترکیبی را می‌توان پیش‌بینی کرد. به‌عنوان مثال نمک‌های با ترکیبات  $\alpha\beta$  یا  $\beta\alpha$  مانند  $\text{CH}_3\text{COONa}$ ، همبستگی حباب‌ها را مهار نمی‌کند، اما نمک‌های با ترکیبات  $\alpha\alpha$  یا  $\beta\beta$  مانند  $\text{NaCl}$  یا  $\text{CaCl}_2$ ، مانع از همبستگی حباب می‌شود.

جدول ۴-۵ تأثیر ترکیب جفت‌های یونی بر همبستگی حباب‌ها (Craig et al., 1993)

		Cations								
		$\beta$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	
Anions		H <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cs <sup>+</sup>	Me <sub>4</sub> N <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>
$\alpha$	OH <sup>-</sup>	✗	I. Sol		I. Sol	✓				
$\alpha$	Cl <sup>-</sup>	✗	✓	✓	✓	✓	✓		✗	✓
$\alpha$	Br <sup>-</sup>	✗		✓		✓		✓		
$\alpha$	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	✗		✓	✓	✓	✓		Unavail	✓
$\beta$	ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Unavail	Unavail	✗	Unavail	I. Sol	Unavail	I. Sol	Unavail	Unavail
$\alpha$	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	✗	✓	✓	I. Sol		✓			✓
$\beta$	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	✓	✗	✗	Unavail	I. Sol	✗	I. Sol	Unavail	Unavail
$\beta$	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	✓	✗	✗		✗	✗	✗	✓	
$\alpha$	Oxalate <sup>2-</sup>	✗	I. Sol	I. Sol	I. Sol	✓	I. Sol	Unavail	Unavail	

Combining Rules:  $\alpha\alpha$  or  $\beta\beta$  gives ✓  $\alpha\beta$  or  $\beta\alpha$  gives ✗

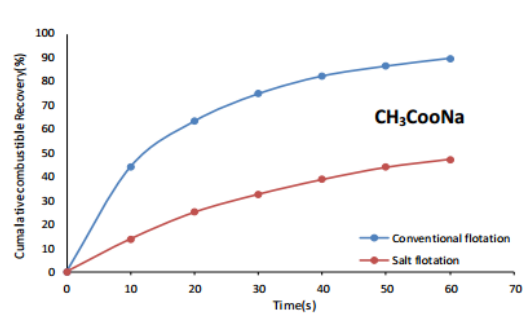
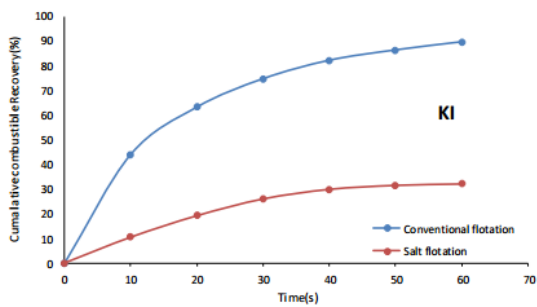
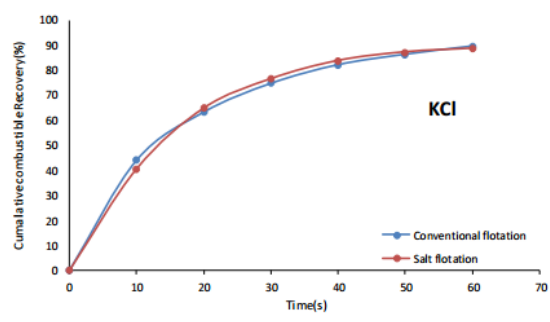
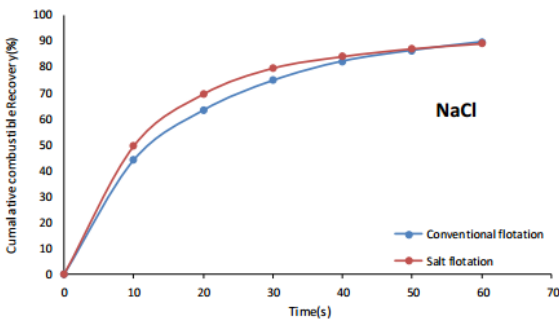
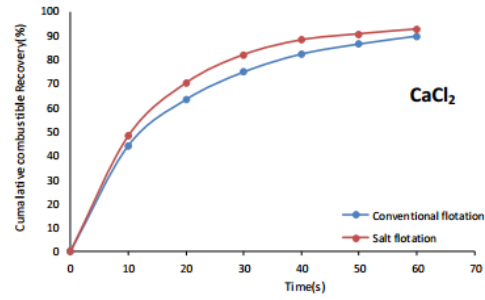
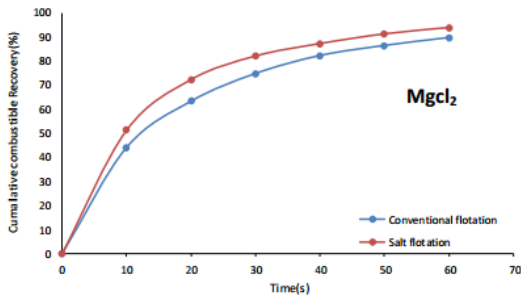
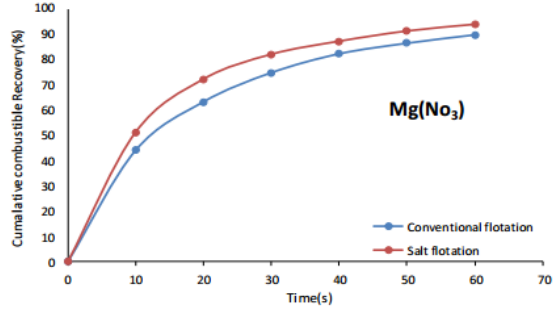
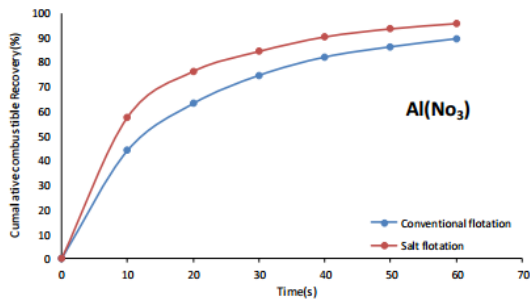
I. Sol=Insufficiently soluble

Unavail=Salt unavailable

Addition of salt: Prevents coalescence ✓ Has no effect on coalescence ✗

### ۳-۴ بررسی سینتیک فلوتاسیون

مقایسه نتایج حاصل از مطالعات سینتیکی فلوتاسیون نمک و فلوتاسیون معمولی در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. تست‌های فلوتاسیون در غلظت ۰/۱ مولار نمک و ۱۵۰۰ گرم بر تن کلکتور نفت سفید و ۱۵۰ گرم بر تن MIBC و با درصد خاکستر ۱۰/۵ انجام شد. همان‌طور که در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است بازیابی کلی زغال سنگ در پایان ۶۰ ثانیه تقریباً برای تمام نمک‌ها یکسان است به جز برای نمک‌های استات سدیم و پتاسیم یدید که مقدار بازیابی کمتری را نسبت به فلوتاسیون معمولی نشان می‌دهند. با این حال سرعت (نرخ) بازیابی به‌طور قابل توجهی با استفاده از فلوتاسیون نمک بهتر است.



شکل ۴-۲۱ نمودار بازیابی تجمعی ماده سوختنی در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون

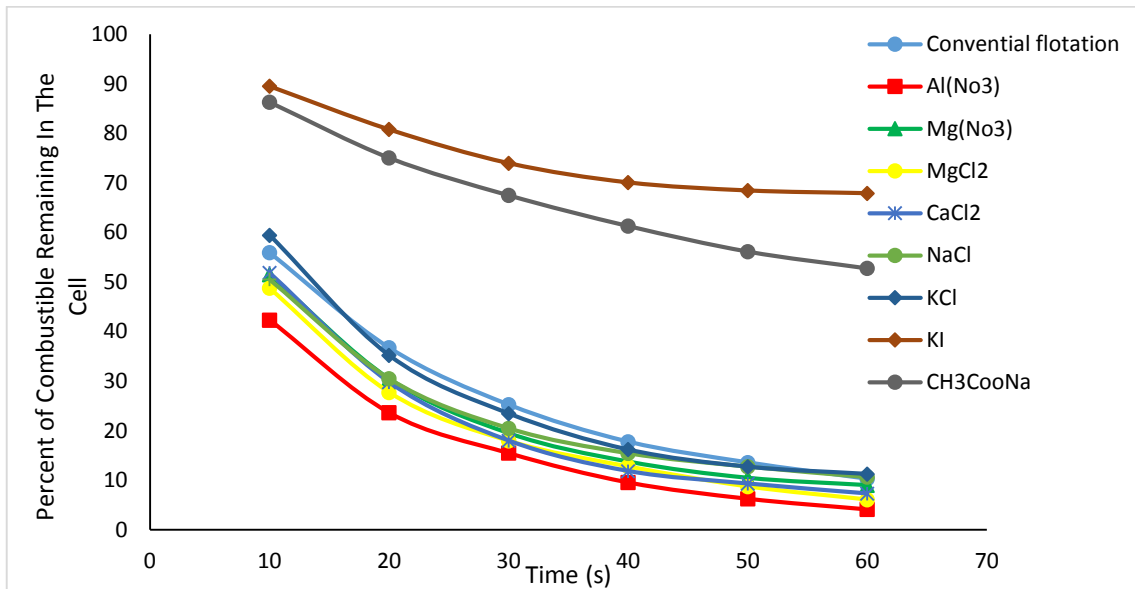
پتاسیم یدید: خاکستر خوراک: ۴۳/۶٪

به‌عنوان مثال در زمان ۳۰ ثانیه بازیابی ذرات زغال‌سنگ برای محلول نمکی آلومینیوم نیترات ۸۵٪

است درحالی‌که برای فلوتاسیون معمولی ۷۴٪ بوده است. همچنین برای نمک‌های استات سدیم و

پتاسیم یدید بازیابی در زمان ۳۰ ثانیه ۳۲٪ و ۲۶٪ است.

نتایج به دست آمده از شکل ۴-۲۱ نشان می دهد که در حضور محلول نمکی یا فلواتاسیون نمک بازیابی قابل احتراق افزایش یافته است.



شکل ۴-۲۲: تفاوت مقدار ماده سوختنی باقی مانده در سلول فلواتاسیون

شکل ۴-۲۲ تفاوت مقدار ماده سوختنی باقی مانده را برای فلواتاسیون معمولی و فلواتاسیون نمک های مختلف نشان می دهد. تفاوت قابل توجهی در آزمایش های سینتیک فلواتاسیون دیده شد. بعد از گذشت ۶۰ ثانیه در فلواتاسیون معمولی، تقریباً ۱۰٪ ماده سوختنی هنوز در سلول باقی ماند در حالی که وقتی که نمک آلومینیوم نیترات استفاده شد ۶٪ ماده سوختنی در سلول باقی ماند. نمک های پتاسیم یدید و استات سدیم بیشترین ماده سوختنی و دیگر نمک ها کمترین مقدار ماده سوختنی باقی مانده را در سلول نشان می دهند.

بازیابی تجمعی ماده سوختنی برای هر آزمایش سینتیک با استفاده از نرم افزار اکسل و به کارگیری روش کمینه سازی تفاضل مربعات بر روی مدل سینتیکی شبه مرتبه اول برآزش شد و نرخ شناورسازی (k) بازیابی بعد از زمان بی نهایت ( $R_{\infty}$ )، ضریب همبستگی مدل ( $R^2$ ) و مربع حداقل بازیابی ( $R_m^{-2}$ ) ( $R_c$ ) اندازه گیری و بازیابی مدل سازی شده، محاسبه شد. نتایج آن در جدول (۴-۶) ارائه شده است.

جدول ۴-۶: نتایج حاصل از برازش مدل سینتیکی مرتبه یک در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون

پارامترهای مدل				خاکستر خوراک	نوع فلوتاسیون
$(R_m - R_c)^2$	$R^2$	$R_{\infty}$	$K_1$		
۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۶۷	۹۰/۴۶	۰/۰۶۱۸	۱۰/۵	فلوتاسیون معمولی
۰/۰۰۲۳	۰/۹۹۹۶	۹۴/۰۳	۰/۰۸۷۹	۱۰/۵	محلول نمکی آلومینیوم نیترات
۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۹۶	۹۱/۵۷	۰/۰۷۲۸	۱۰/۵	محلول نمکی منیزیم نیترات
۰/۰۰۱	۰/۹۹۹۸	۹۳/۶۰	۰/۰۷۶۱	۱۰/۵	محلول نمکی منیزیم کلرید
۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۶	۹۳/۰۱	۰/۰۷۰۵	۱۰/۵	محلول نمکی کلسیم کلرید
۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۷	۹۱/۷۲	۰/۰۷۸۶	۱۰/۵	محلول نمکی سدیم کلرید
۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۶	۸۸/۵۹	۰/۰۶۰۰	۱۰/۵	محلول نمکی پتاسیم کلرید
۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۴۵	۳۶/۸۷	۰/۰۳۸۱	۴۳/۵۸	محلول نمکی پتاسیم یدید
۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۸	۵۸/۹۹	۰/۰۲۶۹	۱۰/۵	محلول نمکی استات سدیم

نتایج به دست آمده از جدول ۴-۶ نشان داد که نمک‌های نیترا ته و کلرید بازیابی و ثابت سینتیک بیشتری نسبت به فلوتاسیون معمولی دارند در حالی که نمک‌های استات سدیم ثابت سینتیک و بازیابی کمتری را نشان دادند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که در حضور محلول نمکی ثابت سینتیک بهبود یافته است.

#### ۴-۴ جمع بندی

در این فصل بعد از ارائه مقادیر خاکستر در کنسانتره و باطله آزمایش‌ها، به بررسی تأثیر نمک‌های معدنی بر رفتار فلوتاسیون زغال سنگ در حضور و عدم حضور معرف‌های شیمیایی پرداخته شد و سپس نتایج سینتیک فلوتاسیون در فلوتاسیون نمک و فلوتاسیون معمولی بررسی شد. مهم‌ترین نتایج این فصل را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- نمک‌های معدنی به روشنی بازیابی ماده سوختنی را با افزایش غلظت نمک بهبود می‌دهند. تفاوت در مقدار بازیابی بستگی به نوع نمک و غلظت نمک دارد. نمک‌های نیترا ته و کلرید بیشترین مقدار

بازیابی و نمک استات سدیم کمترین بازیابی را نشان داد بطوریکه با افزایش غلظت نمک مقدار بازیابی برای نمک‌های نیترا ته و کلرید تقریباً به ۹۰٪ افزایش یافته است در حالی که در نمک استات سدیم بیشترین بازیابی در غلظت ۰/۵ مولار ۴۴٪ بوده است.

۲- بیشترین مقدار بازیابی در حضور ۱۵۰ گرم بر تن کفساز MIBC و ۱۵۰۰ گرم بر تن کلکتور نفت سفید ۹۶٪ است در حالی که با افزایش غلظت نمک غلظت به ۰/۵ مولار نمک آلومینیوم نیترات می‌توان به همین مقدار بازیابی رسید.

۳- بازیابی ماده سوختنی در درصد خاکسترهای مختلف و در حضور محلول نمکی (فلوتاسیون نمک) بهبود پیدا کرده است اما مقدار بازیابی در خوراک با درصد خاکستر کم بیشتر از خوراک با درصد خاکستر بالا هست.

۴- پایداری کف در محلول نمکی با افزودن کفساز به دلیل تولید حباب‌های کوچک و فراوان افزایش می‌یابد که در نتیجه منجر به بهبود بازیابی و بازیابی ماده سوختنی می‌شود اما تأثیر افزودن کفساز در محلول نمکی استات سدیم بر بازیابی به دلیل نداشتن غلظت گذار و تأثیر کفساز بر همبستگی حباب‌ها بیشتر از نمک‌های دیگر است. مقدار بازیابی ماده سوختنی در حضور محلول نمکی استات سدیم و با افزودن کفساز ۳۵ درصد و برای دیگر نمک‌ها تقریباً ۱۰ درصد افزایش یافته است.

۵- مقدار بازیابی و بازیابی ماده سوختنی با درصد خاکستر متفاوت با افزودن کلکتور به محلول نمکی به دلیل افزایش خاصیت آبرانی بهبود می‌یابد اما مقدار بازیابی در خوراکی با درصد خاکستر بالا کمتر از خوراکی با درصد خاکستر پایین است که احتمالاً به دلیل کاهش خاصیت آبرانی ذرات در مقدار خاکستر بالا باشد.

۶- برهم‌کنش نمک‌های معدنی نشان داد که نمک‌های با کاتیون‌های سه‌ظرفیتی تأثیر بیشتری بر بازیابی نسبت به دیگر کاتیون‌ها دارند بطوریکه برهم‌کنش نمک‌های آلومینیوم نیترات و منیزیم نیترات بیشترین مقدار بازیابی و نمک‌های پتاسیم دید و پتاسیم کلرید کمترین مقدار بازیابی را نشان دادند.

۷- با افزودن معرف‌های شیمیایی به محلول نمکی مقدار بازیابی افزایش می‌یابد اما تأثیر قابل توجهی

بر مقدار بازیابی ندارد بطوریکه می‌توان با افزایش غلظت نمک به همان مقدار بازیابی دست‌یافت و در هزینه معرف‌های شیمیایی صرفه‌جویی کرد یا حداقل از یکی از معرف‌های شیمیایی استفاده کرد و هزینه‌های عملیاتی را کاهش داد.

۸- پایداری کف در حضور محلول نمکی افزایش می‌یابد بطوریکه افزایش غلظت نمک منجر به کاهش اندازه حباب و تولید حباب‌های ریز فراوانی می‌شود که پایداری کف بستگی به نوع نمک و غلظت نمک دارد. محلول نمکی آلومینیوم نیترات بیشترین پایداری و استات سدیم کمترین پایداری را نشان داد.

۹- از همبستگی حباب‌ها در حضور محلول نمکی جلوگیری می‌شود بویژه در غلظت بالای نمک که منجر به افزایش بازیابی می‌شود ولی نمک استات سدیم تأثیر بر جلوگیری از همبستگی حباب‌ها ندارد و مقدار بازیابی کمتری را نشان می‌دهد.

۱۰- ارتفاع کف با افزودن نمک‌های معدنی به سیستم فلوتاسیون افزایش می‌یابد و منجر به افزایش بازیابی می‌شود که نشان‌دهنده این است ذرات بیشتری به فاز کف انتقال یافته است.

۱۱- آزمایش‌های سینتیک در فلوتاسیون نمک و فلوتاسیون معمولی نشان داد که میزان بازیابی ماده سوختنی در حضور این محلول افزایش یافته است. سینتیک فلوتاسیون نمک بیشتر از فلوتاسیون معمولی است.

۱۲- با افزایش غلظت نمک علاوه بر اینکه بازیابی افزایش می‌یابد مقدار خاکستر کنسانتره هم افزایش می‌یابد که این به دلیل به دام افتادن یا دنباله‌روی کانی‌های خاکستر در محلول نمکی است.



## فصل پنجم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به نتایج به دست آمده از این تحقیق پرداخته شده است سپس به پیشنهادهایی برای ادامه تحقیقات در آینده اشاره می شود.

## ۵-۲ نتایج

مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- افزودن نمک های معدنی به سیستم فلوتاسیون (فلوتاسیون نمک) باعث بهبود بازیابی زغال سنگ می شوند که بستگی به نوع و غلظت نمک دارد. نمک آلومینیوم نیترات بهترین بازیابی و نمک استات سدیم کمترین بازیابی را نشان می دهد بطوریکه با افزایش غلظت نمک آلومینیوم نیترات از ۰/۰۵ به ۰/۵ مولار بازیابی ماده سوختنی از ۵۰٪ به ۹۴٪ افزایش یافته است در حالی که در نمک استات سدیم مقدار بازیابی از ۲۱٪ به ۴۴٪ رسیده است

۲- در غیاب محلول نمکی و در فلوتاسیون معمولی بیشترین مقدار بازیابی در حضور ۱۵۰ گرم بر تن کف ساز MIBC و ۱۵۰۰ گرم بر تن کلکتور نفت سفید ۹۶٪ است در حالی که در غلظت ۰/۵ مولار نمک آلومینیوم نیترات می توان به همین مقدار بازیابی رسید.

۳- در حضور محلول نمکی (فلوتاسیون نمک) و عدم حضور معرف های شیمیایی بازیابی ماده سوختنی در درصد خاکسترهای مختلف بهبود پیدا کرده است اما مقدار بازیابی در خوراک با درصد خاکستر کم بیشتر از خوراک با درصد خاکستر بالا هست.

۴- افزودن کف ساز به محلول نمکی به دلیل پایداری و کوچک شدن ابعاد حباب، بازیابی و بازیابی ماده سوختنی را افزایش داده است اما مقدار تغییرات بازیابی با افزودن کف ساز در محلول نمکی استات سدیم به دلیل نداشتن غلظت گذار و تأثیر کف ساز بر همبستگی حباب ها بیشتر از نمک های دیگر است. مقدار بازیابی ماده سوختنی در حضور محلول نمکی استات سدیم با افزودن کف ساز ۳۵ درصد و برای دیگر نمک ها تقریباً ۱۰ درصد افزایش یافته است.

۵- با افزودن کلکتور به محلول نمکی به دلیل افزایش خاصیت آبرانی ذرات، بازیابی و بازیابی ماده

سوختنی در درصد خاکسترهای مختلف بهبود پیدا کرده است ولی مقدار بازیابی در خوراکی با درصد خاکستر بالا کمتر از خوراکی با درصد خاکستر پایین است که احتمالاً به دلیل کاهش خاصیت آبرانی ذرات در مقدار خاکستر بالا باشد بطوریکه مقدار بازیابی برای نمک‌های معدنی در خوراکی با درصد خاکستر پایین ۱۰ درصد بیشتر از خوراکی با درصد خاکستر بالا است.

۶- تأثیر برهمکنش نمک‌های معدنی نشان داد که نمک‌های با کاتیون‌های سه‌ظرفیتی تأثیر بیشتری بر بازیابی نسبت به دیگر کاتیون‌ها دارند بطوریکه برهمکنش نمک‌های آلومینیوم نیترات و منیزیم نیترات بیشترین مقدار بازیابی و نمک‌های پتاسیم یدید و پتاسیم کلرید کمترین مقدار بازیابی را نشان دادند.

۷- افزودن معرف‌های شیمیایی به محلول نمکی بازیابی را افزایش می‌دهد اما تأثیر قابل توجهی بر مقدار بازیابی ندارد بطوریکه می‌توان با افزایش غلظت نمک به همان مقدار بازیابی دست یافت و در مقدار معرف‌های شیمیایی صرفه‌جویی کرد یا حداقل از یکی از معرف‌های شیمیایی استفاده کرد و هزینه‌های عملیاتی را کاهش داد.

۸- افزایش غلظت نمک باعث کاهش اندازه حباب‌ها و تولید حباب‌های کوچک‌تر می‌شود و پایداری کف را افزایش می‌دهند که بستگی به نوع نمک و غلظت نمک دارد. همانند بازیابی، محلول نمکی آلومینیوم نیترات بیشترین پایداری و استات سدیم کمترین پایداری را نشان داد.

۹- با افزایش غلظت نمک‌های معدنی درصد همبستگی حباب‌ها کاهش می‌یابد و کاتیون‌های با ظرفیت بالا نسبت به کاتیون‌های با ظرفیت پایین در غلظت کمتری از نمک از همبستگی حباب‌ها جلوگیری می‌کنند.

۱۰- افزودن نمک‌های معدنی به سیستم فلوتاسیون باعث افزایش ارتفاع کف و بازیابی می‌شوند که نشان‌دهنده این است ذرات بیشتری به فاز کف انتقال یافته است. مقدار ارتفاع کف برای نمک‌های نیتراته و کلرید بیشتر ولی برای نمک استات سدیم به دلیل حباب‌های ناپایدار کمتر بود.

۱۱- نرخ سینتیک فلوتاسیون در حضور محلول نمکی بیشتر از فلوتاسیون معمولی است.

۱۲- با افزایش غلظت نمک‌های معدنی مقدار خاکستر کنسانتره افزایش یافته است که نشان‌دهنده دنباله‌روی کانی‌های خاکستر در محلول نمکی بخصوص در غلظت بالای نمک است.

### ۳-۵ پیشنهادها

در زمینه استفاده از نمک‌های معدنی در فرآیند فلوتاسیون، پیشنهادها زیر را می‌توان به‌منظور ادامه تحقیقات در آینده مدنظر گرفت:

- ۱- انجام آزمایش‌های نیمه‌صنعتی و صنعتی با توجه به نتایج این تحقیق با استفاده از آب‌شور
- ۲- بررسی سینتیک فلوتاسیون زغال‌سنگ در حضور محلول میکرو نانوحباب و امواج مافوق صوت بانمک‌های معدنی
- ۳- مطالعه و بررسی تأثیرات آب‌شور یا نمک‌های معدنی در خوردگی تجهیزات و سلول‌های فلوتاسیون

## منابع

- ابراهیمی ح، (۱۳۹۶). "بهبود راندمان جدایش زغال‌سنگ با استفاده از فناوری میکرو نانو حباب"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، کارآموزیان م (استاد راهنما)، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.
- اولیاء زاده م، نوع‌پرست م، عبداللهی ه، (۱۳۸۴) "ماشین‌های فلوتاسیون (مبانی و اصول طراحی)"، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)، تهران.
- رضایی ب، (۱۳۹۴) "تکنولوژی زغال‌شویی"، چاپ دوم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- رضایی ب، (۱۳۷۵) "فلوتاسیون"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه هرمزگان.
- رضوانی ن، (۱۳۹۵) "بررسی تأثیر امواج مافوق صوت بر فلوتاسیون زغال‌سنگ البرز شرقی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، کارآموزیان م (استاد راهنما)، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عبداللهی م، (۱۳۸۲) "شیمی فلوتاسیون"، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)، تهران.
- قدیانی الف، (۱۳۹۶) "بررسی امواج فراصوت بر بهبود فرآیند فلوتاسیون زغال‌سنگ"، رساله دکتری مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، نوع‌پرست م (استاد راهنما)، شفایی تنکابنی ض (استاد راهنما)، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران
- نعمت‌اللهی ح، (۱۳۸۷) "کانه‌آرایی"، جلد ۲، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- یزدی م، (۱۳۸۲) "زغال‌سنگ (از منشا تا اثرات زیست‌محیطی)"، چاپ اول، انتشارات جهاد

- Ayirala, S. C., Yousef, A. A., Li, Z., & Xu, Z. (2018). **Coalescence of Crude Oil Droplets in Brine Systems: Effect of Individual Electrolytes**. *Energy & Fuels*, 23(5), 5763-5771.
- Barbian, N., Ventura-Medina, E., & Cilliers, J. J. (2003). **Dynamic froth stability in froth flotation**. *Minerals Engineering*, 16(11), 1111-1116.
- Bournival, G., Ata, S., & Jameson, G. J. (2014). **The influence of submicron particles and salt on the recovery of coarse particles**. *Minerals Engineering*, 69, 146-153.
- Bournival, G., Pugh, R. J., & Ata, S. (2012). **Examination of NaCl and MIBC as bubble coalescence inhibitor in relation to froth flotation**. *Minerals Engineering*, 25(1), 47-53.
- Castro, S., Miranda, C., Toledo, P., & Laskowski, J. S. (2013). **Effect of frothers on bubble coalescence and foaming in electrolyte solutions and seawater**. *International Journal of Mineral Processing*, 124, 8-14.
- Celik, M. S., Hancer, M., & Miller, J. D. (2002). **Flotation chemistry of boron minerals**. *Journal of colloid and interface science*, 256(1), 121-131.
- Celik, M. S., & Somasundaran, P. (1986). **The effect of multivalent ions on the flotation of coal**. *Separation Science and Technology*, 21(4), 393-402.
- Christenson, H. K., Bowen, R. E., Carlton, J. A., Denne, J. R. M., & Lu, Y. (2008). **Electrolytes that show a transition to bubble coalescence inhibition at high concentrations**. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(3), 794-796.
- Craig, V. S. J., Ninham, B. W., & Pashley, R. M. (1993). **Effect of electrolytes on bubble coalescence**. *Nature*, 364(6435), 317.
- Dishon, M., Zohar, O., & Sivan, U. (2009). **From repulsion to attraction and back to repulsion: the effect of NaCl, KCl, and CsCl on the force between silica surfaces in aqueous solution**. *Langmuir*, 25(5), 2831-2836.
- DoymuŞ, K. (2007). **The effect of ionic electrolytes and pH on the zeta potential of fine coal particles**. *Turkish Journal of Chemistry*, 31(6), 589-597.
- Farrokhpay, S., & Zanin, M. (2011). **Effect of water quality on froth stability in flotation**.
- Gorain, B. K., Harris, M. C., Franzidis, J. P., & Manlapig, E. V. (1998). **The effect**

- of froth residence time on the kinetics of flotation.** *Minerals Engineering*, 11(7), 627-638.
- Han, C. (1983). **Coal cleaning by froth flotation.**
  - Harvey, P. A., Nguyen, A. V., & Evans, G. M. (2002). **Influence of electrical double-layer interaction on coal flotation.** *Journal of Colloid and Interface Science*, 250(2), 337-343.
  - Hewitt, D., Fornasiero, D., & Ralston, J. (1994). **Bubble particle attachment efficiency.** *Minerals Engineering*, 7(5-6), 657-665
  - Kurniawan, A. U., Ozdemir, O., Nguyen, A. V., Ofori, P., & Firth, B. (2011). **Flotation of coal particles in MgCl<sub>2</sub>, NaCl, and NaClO<sub>3</sub> solutions in the absence and presence of Dowfroth 250.** *International Journal of Mineral Processing*, 98(3-4), 137-144.
  - Laskowski, J. (2001). **Coal flotation and fine coal utilization** (Vol. 14). Elsevier.
  - Laskowski, J., & Castro, S. (2015). **Flotation in concentrated electrolyte solutions.** *International Journal of Mineral Processing*, 144, 50-55.
  - Li, C., & Somasundaran, P. (1991). **Reversal of bubble charge in multivalent inorganic salt solutions—effect of magnesium.** *Journal of Colloid and Interface Science*, 146(1), 215-218.
  - Li, C., & Somasundaran, P. (1992). **Reversal of bubble charge in multivalent inorganic salt solutions—Effect of aluminum.** *Journal of colloid and interface science*, 148(2), 587-591.
  - Li, C., & Somasundaran, P. (1993). **Role of electrical double layer forces and hydrophobicity in coal flotation in sodium chloride solutions.** *Energy & Fuels*, 7(2), 244-248.
  - Li, G., Deng, L., Cao, Y., Wang, B., Ran, J., & Zhang, H. (2017). **Effect of sodium chloride on fine coal flotation and discussion based on froth stability and particle coagulation.** *International Journal of Mineral Processing*, 169, 47-52.
  - López-Saucedo, F., Pecina-Treviño, E., la Garza-Rodríguez, D., Ramos-Méndez, K., Camacho-Ortegón, L., & Equihua-Guillén, F. (2016). **Efecto de soluciones de KI, NaCl, MgCl<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en la distribución de tamaños de burbuja y surelación con la flotación de partículas de carbón y materia mineral.** *Revista mexicana de ingeniería química*, 15(1), 221-229.

- Marrucci, G., & Nicodemo, L. (1967). **Coalescence of gas bubbles in aqueous solutions of inorganic electrolytes**. *Chemical Engineering Science*, 22(9), 1257-1265.
- Muzenda, E. (2010). **An investigation into the effect of water quality on flotation performance**.
- Ozdemir, O., Taran, E., Hampton, M. A., Karakashev, S. I., & Nguyen, A. V. (2009). **Surface chemistry aspects of coal flotation in bore water**. *International Journal of mineral processing*, 92(3-4), 177-183.
- Ozdemir, O. (2013). **Specific ion effect of chloride salts on collectorless flotation of coal**. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49.
- Paulson, O., & Pugh, R. J. (1996). **Flotation of inherently hydrophobic particles in aqueous solutions of inorganic electrolytes**. *Langmuir*, 12(20), 4808-4813.
- Polat, M., Polat, H., & Chander, S. (2003). **Physical and chemical interactions in coal flotation**. *International Journal of Mineral Processing*, 72(1-4), 199-213.
- Pugh, R. J., Weissenborn, P., & Paulson, O. (1997). **Flotation in inorganic electrolytes; the relationship between recover of hydrophobic particles, surface tension, bubble coalescence and gas solubility**. *International Journal of Mineral Processing*, 51(1-4), 125-138.
- Quinn, J. J., Kracht, W., Gomez, C. O., Gagnon, C., & Finch, J. A. (2007). **Comparing the effect of salts and frother (MIBC) on gas dispersion and froth properties**. *Minerals Engineering*, 20(14), 1296-1302.
- Quinn, J. J., Sovechles, J. M., Finch, J. A., & Waters, K. E. (2014). **Critical coalescence concentration of inorganic salt solutions**. *Minerals Engineering*, 58, 1-6.
- Ribeiro Jr, C. P., & Mewes, D. (2007). **The effect of electrolytes on the critical velocity for bubble coalescence**. *Chemical Engineering Journal*, 126(1), 23-33.
- Sovechles, J. M., & Waters, K. E. (2015). **Effect of ionic strength on bubble coalescence in inorganic salt and seawater solutions**. *AIChE Journal*, 61(8), 2489-2496
- Veki, L. (2013). **The use of seawater as process water in concentration plant and the effects on the flotation performance of Cu-Mo ore**. Master's thesis, University of Oulu, Finland.[Links].



- Wang, B., & Peng, Y. (2013). **The behaviour of mineral matter in fine coal flotation using saline water**. *Fuel*, 109, 309-315
- Wang, B., & Peng, Y. (2014). **The effect of saline water on mineral flotation—A critical review**. *Minerals*
- Wang, L. K., Shamma, N. K., Selke, W. A., & Aulenbach, D. B. (Eds.). (2010). **Flotation technology**. New York: Humana Press
- Wei, T., Peng, Y., & Vink, S. (2016). **The joint action of saline water and flotation reagents in stabilizing froth in coal flotation**. *International Journal of Mineral Processing*, 148, 15-22
- Wills, B. A., & Finch, J. (2015). **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. Butterworth-Heinemann
- Yu, Y., Ma, L., Cao, M., & Liu, Q. (2017). **Slime coatings in froth flotation: A review**. *Minerals Engineering*, 114, 26-36.
- Zhang, H. (2015). **Effect of electrolyte addition on flotation response of coal**. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 51.
- Zhijun, Z., Jiongtian, L., Zhiqiang, X., & Liqiang, M. (2013). **Effects of clay and calcium ions on coal flotation**. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(5), 689-692.

## Abstract

Flotation is one of the most important common methods of mineral makeup, which is established based on the physicochemical properties of a solid surface for 20 to 200 mesh particle in a fluid and air flow to create the perfect bubble. Despite the many advances made in the processing of valuable minerals, flotation is still used as one of the most effective methods for the preparation of primary concentrates. Flotation is usually performed in the presence of the collector and frother. In coal flotation, oil collector are used to improve the recovery of coal particles. According to the high cost of chemicals, if feasible to remove or consume fewer doses of these reagents in flotation operations, operational costs will be reduced. In this thesis, the focus is on investigating the effect of mineral salts on the behavior of coal flotation. According to recent studies on the effect of inorganic salts on the flotation of various minerals, the effect of salts and the interaction of salts (two types of salt) on the flotation of coal in order to improve coal recovery and reduce chemical use were examined. In addition, the kinetics of coal flotation in the presence of different salts were performed and compared with conventional flotation. The results of these experiments showed that the presence of inorganic salts increases the efficiency of coal flotation and decreases the dose of chemicals. Also the most recovery for nitrate salts were 94%, medium recovery for chloride salts were 93.84% and sodium acetate had the lowest recovery were 44%. Nitrate and chloride salts also prevent bubble coalescence, but sodium acetate salt does not affect the bubble coalescence. The flotation kinetics of coal in the presence of a saline solution is is higher than conventional flotation.

**Keywords:** Flotation, Coal, Mineral Salts, Kinetics



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering**  
**MSc Thesis in Mineral Processing**

**Investigation of the inorganic salts on flotation recovery  
improvement and decreasing reagents**

By: Abdol Rahim Dousti

Supervisor:

Dr. Mohammad Karamoozian

September 2018

