

امکان سنجی جدایش ذرات ریز کوارتز و هماتیت به روش فلو تاسیون حامل

پرستو احمدیان^۱، علی اکبر عبدالله زاده^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان p.ahmadian@grad.kashanu.ac.ir

۲- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان abdazad@kashanu.ac.ir

(۱۳۹۸/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹)

چکیده

این تحقیق برای دستیابی به ساز و کار و شرایط بهینه برای جدایش ذرات ریز (۳۸- μ) کانی کوارتز (شناور) از کانی هماتیت (بازداشت)، به روش فلو تاسیون حامل (مستقیم) انجام شده است. در این مطالعه در ابتدا، انتخاب نوع و محدوده دانه بندی مناسب ذرات حامل به منظور جذب ذرات خالص کوارتز روی سطوح این ذرات انجام شد. سپس، با استفاده از آزمایش های متعدد، تأثیر عوامل مختلف از جمله: نوع و غلظت کلکتور و pH در شناورسازی ذرات محیط بر ذرات حامل بررسی شد. برای انتخاب ذره حامل، تأثیر ذرات پیریت و کلسیت بر جمع آوری انتخابی ذرات کوارتز آزمایش شد. طبق نتایج آزمایش ها، ذرات کلسیت در محدوده دانه بندی (۱۰۶-۷۵+) میکرون به عنوان حامل مناسب برای جذب و جمع آوری ذرات ریز کوارتز و سپس شناورسازی آن ها انتخاب شد. همچنین مشخص شد که آماده سازی ذرات کلسیت با کلکتور، قبل از اضافه نمودن آن ها، تأثیر مثبتی در جذب ذرات ریز کوارتز دارد. آزمایش ها نشان داد بهترین شرایط برای شناور شدن ذرات کلسیت، در $pH=11/5$ و با حضور کلکتور دودسیل آمین با غلظت ۱/۵ کیلوگرم بر تن حاصل می شود. پس از بررسی اثر متغیرهای فرآیند بر پاسخ های به دست آمده، بهینه سازی عوامل عملیاتی با هدف به حداکثر رساندن عیار و بازیابی کوارتز در بخش شناور شده (کنسانتره) فلو تاسون، انجام شد. در شرایط بهینه ساینز حامل (۱۰۶-۷۵+) میکرون و مقدار آن معادل ۳۴ درصد کوارتز ورودی به دست آمد. نتایج آزمایش در این حالت بازیابی کوارتز در کنسانتره حدود ۷۱٪ و عیار آن حدود ۸۱٪ از یک خوراک سنتزی به نسبت ۴۰ درصد هماتیت و ۶۰ درصد کوارتز به دست آمد.

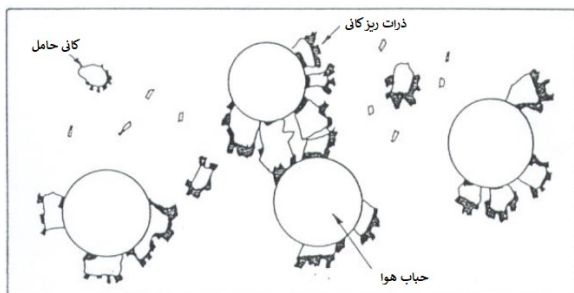
کلمات کلیدی

فلو تاسیون حامل، ذرات ریز، کوارتز، هماتیت، کلسیت

۱- مقدمه

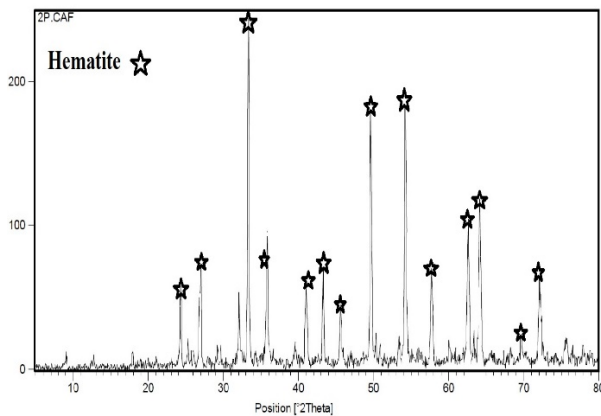
چون تقاضا برای محصولات معدنی همچنان رو به افزایش است، با کاهش ذخایر غنی، استفاده از سنگ‌های معدنی با عیار پایین‌تر و با بافت ریزدانه مورد توجه واقع شده‌است. در این نوع سنگ‌های معدنی به‌دلیل درگیری شدید ذرات و درجه آزادی پایین، نیاز به خردایش بیشتر است. معمولاً فرآوری ذرات ریز به روش‌های معمول فلوتاسیون به‌سختی امکان‌پذیر است. در حقیقت هنگام استفاده از روش معمول فلوتاسیون، ذرات ریز به آسانی شناور نمی‌شوند و یا میزان انتخابی بودن در آن‌ها پایین است، بنابراین به‌راحتی از چرخه فلوتاسیون حذف می‌شوند. این امر نه تنها باعث هدر رفتن کانی‌های مفید بلکه منجر به خطرات زیست‌محیطی نیز می‌شود [۱].

ذرات ریز طی فرآیند فلوتاسیون به‌دلیل برخورد کمتر با حباب‌های هوا، شانس کمتری برای اتصال و ماندن روی آن‌ها و انتقال به بخش شناور را دارند. به‌منظور مقابله با این مشکل با استفاده از خصوصیات فیزیکی شیمیایی و میزان بارسطحی ذرات مورد نظر، روش‌هایی برای ایجاد اتصال بهتر ذرات ریز به حباب‌ها معرفی و بررسی شده‌است. ازجمله این روش‌ها، می‌توان به فلوکولاسیون ذرات آبران، تجمع ذرات آبران شده توسط کلکتورهای روغنی، تولید حباب‌هایی با ابعاد نانو، حضور ذرات حامل و استفاده از سلول فلوتاسیون ستونی اشاره کرد [۲]. در مورد ذرات فوق ریز و کلوئیدی، نیروهای سطحی نسبت به سایر نیروها اهمیت بیشتری دارند و دگرسانی ترکیبات شیمیایی و یا کانی شناختی سطح نقش بسیار مهمی را به‌عنوان عوامل منفی در جدایش این ذرات از یکدیگر ایفا می‌کند [۲]. در روش فلوتاسیون حامل از طریق تجمع ذرات ریز (حمل شونده) در پیرامون ذرات درشت (حامل) و ایجاد اتصال بین آن‌ها و سپس طی فرآیند فلوتاسیون ذرات حامل، ذرات ریز شناور می‌شوند. این مکانیسم بر این اساس استوار است که ذرات بسیار ریز تمایل خاصی نسبت به چسبیدن به یکدیگر را از خود نشان نمی‌دهند ولی تمایل مناسبی از نظر چسبندگی به ذرات درشت‌تر از همان جنس یا از نوع دیگر نشان می‌دهند. فرآیند فلوتاسیون حامل به‌طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مکانیزم فلوتاسیون حامل [۳]

در سال ۱۹۶۱ توسط شرکت معدنی و شیمیایی انگل‌هارد، فلوتاسیون حامل، نخستین بار به‌طور موفقیت‌آمیز برای تولید کائولن استفاده شد. در این روش، حذف ناخالصی‌های تیتانیوم آهن از رس به روش فلوتاسیون حامل با شناور کردن ذرات ریز آنتاز (TiO_2) از رس با استفاده از ذرات حامل کلسیت انجام شد [۴]. سال ۱۹۹۱ توسط راجو و همکاران، فلوتاسیون ذرات ریز کوارتز با استفاده از قطعات درشت‌تر به‌عنوان حامل و کلکتور دودسیل سولفات (SDS) در $pH=9.6$ انجام شد. نتایج نشان داد در حضور ذرات درشت‌تر به‌عنوان حامل تمایل کوارتز به شناور شدن بیشتر می‌شود [۵-۶]. در سال ۱۹۹۸ ابدل خالک و همکاران، روش فلوتاسیون حامل ذرات ریز کائولن با دانه‌بندی کمتر از ۲ میکرون از ناخالصی آنتاز با استفاده از کلسیت با دانه‌بندی $(+10 -25)$ میکرون به‌عنوان حامل بررسی شد [۷]. سال ۱۹۸۵ توسط میچ و همکاران، جدایش هماتیت با عنوان فلوتاسیون حامل هماتیت از گانگ کوارتز با استفاده از ذرات درشت‌تر هماتیت از همان کانی گزارش شد. این آزمایش با استفاده از کلکتور سدیم اولئات در $pH=9-10$ انجام شد. طی این آزمایش کلرید فریک به‌عنوان بازداشت‌کننده نیز استفاده شد که نقش این ماده شیمیایی فلوکوله کردن هماتیت‌های ریزدانه برای چسبندگی بهتر به حامل بود و در نتیجه به جدایش بیشتر هماتیت کمک کرد [۸]. سال ۲۰۱۷ توسط لی و همکاران حضور ذرات درشت‌تر هماتیت به‌عنوان حامل برای هماتیت ریزدانه آزمایش شد [۹]. سال ۲۰۱۷ توسط ژنگ و همکاران فلوتاسیون حامل ذرات ریز اسمیت زونیت ($ZnCO_3$) آزمایش شد. ذرات ریز اسمیت‌زونیت با استفاده از اولئات به‌عنوان کلکتور و پلی-استایرن (PS) پودری به‌عنوان حامل با دانه‌بندی ۹۰ تا ۱۵۰ میکرون در $pH=7-8$ آزمایش شد [۱۰].



شکل ۲- نتیجه آزمایش XRD نمونه هماتیت

۲-۲- روش آزمایش

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از سدیم اولئات و دودسیل آمین به‌عنوان کلکتور برای کلسیت و از گزنتات برای پیریت استفاده شد. برای تنظیم pH از سدیم هیدروکسید (NaOH) و اسید کلریک (HCl) استفاده شد. آب مصرفی در تمامی آزمایش‌ها آب مقطر است. برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از سلول هالیموند به حجم ۲۵۰ میلی لیتر مجهز به شیر تنظیم هوا و اسپارجر متخلخل شیشه‌ای و سلول مکانیکی نوع دنور به حجم ۲ لیتر استفاده شده است. مقدار نمونه خالص مورد استفاده در سلول هالیموند ۵ گرم بوده است. برای آزمایش روی نمونه سنتزی نیز ۵ گرم از نمونه هماتیت و کوارتز به نسبت ۴۰:۶۰ درصد تهیه شد. تمامی آزمایش‌ها در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول ذره حامل ابتدا توسط کلکتور در pH مناسب آبران شده و در مرحله دوم به پالپ حاوی ذرات ریز با حفظ pH اضافه شد. زمان آماده-سازی حامل ۵ دقیقه و زمان اختلات با نمونه ۵ دقیقه بوده است. بعد از مخلوط شدن به مدت ۵ دقیقه هوا دمیده شد.

لازم به ذکر است برای جداسازی ذرات حامل در کنسانتره از سرند به دلیل تفاوت دانه‌بندی استفاده شد

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش‌های فلوتاسیون تعیین نوع حامل

حامل پیریت

در منابع، نقطه بار صفر (ZPC) پیریت برابر با ۱/۸ و بیشترین بازیایی پیریت خالص در دانه‌بندی (۷۵-۳۸) میکرون و

چون پژوهش‌های انجام شده در زمینه فلوتاسیون حامل اندک و محدود است در این مقاله به‌منظور معرفی ذره حامل مناسب برای جمع‌آوری ذرات ریز کوارتز یا هماتیت ریزدانه، عملکرد چندین حامل معدنی بررسی شد. همچنین دو عامل مقدار و اندازه ذرات حامل و نیز نحوه به‌کارگیری این ذرات حامل به-عنوان عوامل عملیاتی عملیاتی مؤثر مطالعه شد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و آماده سازی نمونه

برای انجام آزمایش‌ها نمونه‌هایی خالص از هماتیت، کوارتز و کلسیت از معدن ده زمان بردسکن تهیه شد. برای تهیه پیریت خالص از نمونه‌ها و مواد موجود در آزمایشگاه دانشگاه استفاده شد. به‌منظور کاهش اندازه ذرات نمونه هماتیت و کوارتز تا ابعاد زیر ۳۸ میکرون، نمونه‌ها به مدت ۶۰ و ۷۵ دقیقه در آسیای میله‌ای نرم شدند. در مورد کلسیت و پیریت، توسط سرند به مقدار مورد نیاز نمونه در دانه‌بندی متغیر بین ۳۸ تا ۱۰۶ میکرون آماده شد.

برای اطمینان از خالص بودن هماتیت و مشخص شدن مقدار کوارتز موجود، مقداری از نمونه توسط XRD (مدل ۰۰۰۰۰۰۰ ساخت شرکت فیلیپس کشور هلند) آنالیز شد. نتایج این آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشخص است، نمونه حاوی هماتیت و مقداری کوارتز است. وجود این مقدار کوارتز، در آزمایش‌ها و محاسبات مورد توجه قرار گرفته است. لازم به ذکر است چون نمونه کوارتز و کلسیت و پیریت به‌صورت کاملاً خالص دریافت شد، آنالیز XRD روی آن‌ها انجام نشد.

نمونه هماتیت و کوارتز خالص پس از رسیدن به ابعاد کمتر از ۳۸ میکرون برای هریک از آزمایش‌ها به مقدار معین آماده-سازی شد. برای تهیه نمونه مخلوط به‌طور مجزا نمونه با نسبت ۴۰ درصد هماتیت و ۶۰ درصد کوارتز تهیه شد. همچنین کلسیت و پیریت با دانه بندی (۳۸-، (۷۵-۳۸) و (۱۰۶-۷۵) میکرون به‌صورت جداگانه آماده شدند.

مقدار آن بررسی شد. برای تنظیم pH از سدیم هیدروکسید (NaOH) و هیدروکلریک اسید (HCL) استفاده شد. جدول ۲ نتایج آزمایش‌ها برای پیدا کردن شرایط بهینه برای حداکثر شناور شدن را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج فلوتاسیون کلسیت برای تعیین نوع و مقدار کلکتور

آزمایش	pH	مقدار کلکتور (kg/t)	نوع کلکتور	مقدار وزنی کنسانتره (%)
۱	۱۰/۵	۱	دودسیل آمین	۲۰
۲	۱۱/۵	۱	دودسیل آمین	۴۰
۳	۱۰/۵	۱/۵	دودسیل آمین	۸۰
۴	۱۱/۵	۱/۵	دودسیل آمین	۹۵
۵	۱۰/۵	۲	دودسیل آمین	۸۴
۶	۱۱/۵	۲	دودسیل آمین	۹۷
۷	۶/۵	۱/۵	اولئات	۶۰
۸	۶/۵	۲	اولئات	۷۰

برای انجام آزمایش‌ها ابعاد دانه‌بندی کلسیت (۳۸+۷۵-) میکرون و ثابت در نظر گرفته شد. با توجه به جدول ۲ افزایش مقدار کلکتور باعث جدایش بیشتر کلسیت شد اما برای اقتصادی بودن و جلوگیری از مصرف بیش از اندازه کلکتور مقدار بهینه کلکتور ۱/۵ kg/t و دودسیل آمین به‌عنوان کلکتور کلسیت در pH=۱۱/۵ انتخاب شد. با توجه به شرایط به‌دست آمده از حامل کلسیت، تأثیر حامل بر میزان شناور کردن جداگانه کوارتز و هماتیت خالص و همچنین مخلوط سنتزی بررسی شد. مقدار حامل نصف جامد ورودی لحاظ شد. مقدار کلکتور در تمامی آزمایش‌ها ثابت بوده است.

جدول ۳- نتایج تأثیر حامل کلسیت بر ذرات ریز

آزمایش	نوع ذرات	شناور شده در حضور حامل (%)	شناور شده بدون حامل (%)
۱	کوارتز	۵۸	۳۰
۲	هماتیت	۲۵	۱۰

pH=۶/۴ گزارش شده است [۱۱]. مقدار بازیابی پیریت خالص در شرایط ذکر شده توسط کلکتور گزینش با غلظت ۱ kg/t و کف ساز MIBC ۹۸٪ در سلول هالیموند به‌دست آمد. ذرات پیریت به‌عنوان حامل به مقدار نصف خوراک ورودی به همراه ذرات ریز کوارتز آزمایش شد. نتایج نشان داد در این حالت ذرات کوارتز بیشتری به بخش شناور منتقل شده است. مشابه شرایط ذکر شده برای ذرات ریز هماتیت به‌طور جداگانه و مخلوط سنتزی نیز انجام شد. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- اثر حامل پیریت بر بازیابی ذرات ریز

آزمایش	ذرات	شناور شده در حضور حامل (%)	شناور شده در عدم حضور حامل (%)
۱	کوارتز	۸۵	۶۰
۲	هماتیت	۸۰	۷۳
۳	مخلوط سنتزی	۶۵	۶۰

با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که ذرات ریز کوارتز و هماتیت در آزمایش‌های جداگانه در شرایط استفاده از حامل به میزان بیشتری شناور می‌شوند. در مورد نمونه مخلوط مشاهده شد که حضور حامل پیریت برای شناورسازی تقریباً بدون تأثیر بوده است. در این آزمایش مقدار کوارتز و هماتیت موجود در بخش شناور شده اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد در حضور حامل هر دو ذره تقریباً به نسبت یکسانی شناور شدند. در نتیجه پیریت نمی‌تواند حامل مناسبی برای ذرات هماتیت و کوارتز ریز دانه باشد البته حضور کف‌ساز و پدیده دنباله‌روی نیز در این امر تأثیرگذار است.

حامل کلسیت

کلسیت از نوع کانی‌هایی با نقطه بار صفر بالا است و نقطه پتاسیل صفر آن بین ۸-۹/۵ است، کلکتورهای دودسیل آمین و سدیم اولئات از جمله کلکتورهای تأثیرگذار بر این ذره می‌باشند و حداکثر شناور شدن آن در pH های ۶/۵، ۱۰/۵ و ۱۱/۵ گزارش شده است [۱۲]. برای به‌دست آوردن بهترین شرایط ابتدا در pH های ذکر شده، کلکتورهای مؤثر و همچنین

حضور حامل نیز انجام شد و جدایش کوارتز در این شرایط برابر با ۳۱/۶٪ به دست آمد.

جدول ۵: نتایج درصد وزنی حامل کلسیت نسبت به کوارتز

آزمایش	درصد وزنی حامل (حامل: کوارتز)	جدایش در حضور حامل (%)	جدایش بدون حامل (%)
۱	۱:۱	۴۰	
۲	۱:۰/۵	۷۳	
۳	۱:۰/۲۵	۹۲	
۴	۱:۰		۳۱/۶

لازم به ذکر است، مقدار کلکتور در آزمایش‌های جدول ۵ ثابت بوده است. در شرایط به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه خالص (کلسیت با دانه بندی ۱۰۶-۷۵) به عنوان حامل به مقدار ۲۵ درصد کوارتز میکرون و کلکتور دودسیل آمین با غلظت ۱/۵ kg/t در pH=۱۱/۵، آزمایش فلوتاسیون در سلول هالیموند روی مخلوط سنتزی به نسبت ۴۰ درصد هماتیت و ۶۰ درصد کوارتز برای جدایش کوارتز انجام شد. در نتیجه این آزمایش باطله به دست آمده دارای کوارتز با عیار ۱۴٪ و بازیابی ۱۸٪ حاصل شد.



شکل ۳- تصویر گرفته شده از محصولات آزمایش توسط بینوکلار (الف) کنسانتره، (ب) باطله

طبق جدول ۳، در هر دو آزمایش حضور حامل کلسیت منجر به شناور شدن ذرات ریز شده است. درحالی که در عدم حضور حامل شناور شدن ذرات به مراتب کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر کلسیت به عنوان حامل بر ذرات ریز کوارتز بیشتر از هماتیت است. بنابراین می‌توان کلسیت را به عنوان حامل برای ذرات ریز کوارتز معرفی کرد.

۳-۲- آزمایش‌های تعیین شرایط حامل

بررسی دانه بندی

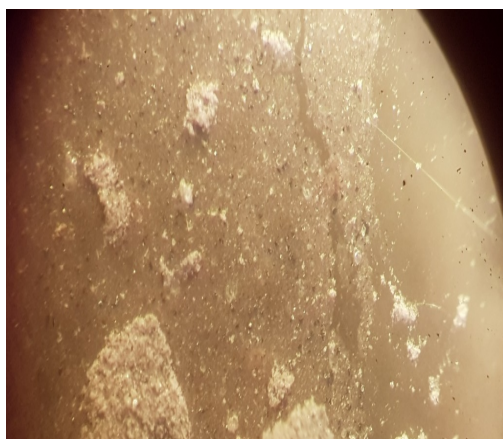
از آنجا که آزمایش‌ها در دانه بندی ثابت (۷۵-۳۸) میکرون انجام شد، برای بدست آوردن شرایط بهتر ذرات حامل دانه بندی‌های ۳۸- و (۱۰۶-۷۵) میکرون نیز بررسی شد (جدول ۴). این جدول نشان می‌دهد که کلیست با دانه بندی (۷۵+۳۸) میکرون توسط کلکتور دودسیل آمین به مقدار ۱۰۶ kg/t در pH=۱۱/۵ دارای حداکثر جذب و شناورسازی ذرات ریز کوارتز می‌باشد.

جدول ۴: بررسی تأثیر دانه بندی کلسیت در جذب و شناورسازی

آزمایش	دانه بندی حامل کلسیت (μm)	شناور شده در حضور حامل (%)	شناور شده بدون حامل (%)
۱	(۳۸-)	۴۸	۲۸
۲	(۳۸+۷۵-)	۵۸	۳۰
۳	(۷۵+۱۰۶-)	۷۳	۳۰

بررسی غلظت حامل

به منظور بررسی تأثیر مقدار حامل در عملکرد جدایش ذرات ریز، میزان حامل در سه نسبت مختلف با میزان کوارتز، مورد آزمایش قرار گرفت. از جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که بهترین شرایط برای شناور شدن زمانی است که مقدار حامل معادل ۲۵٪ وزن کوارتز باشد. این آزمایش در شرایط عدم حضور حامل نیز انجام شد و جدایش کوارتز در این شرایط دارای کمترین مقدار بود. لازم به ذکر است مقدار کلکتور در آزمایش‌های جدول ۵ ثابت بوده است. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت بهترین شرایط برای انجام فلوتاسیون حامل زمانی است مقدار حامل نسبت به کوارتز برابر با ۲۵٪ وزن کوارتز باشد این آزمایش در شرایط عدم



شکل ۴- تصویر گرفته شده از کنسانتره آزمایش ۳ جدول ۶ در حضور نشاسته توسط بینوکولار

تصویر برداشت شده (شکل ۴) از محصول آزمایش شماره ۳ در جدول ۶، مشخص می‌کند که نشاسته مورد استفاده چون در واقع یکی از انواع پلیمرها برای تجمع ذرات ریز و به‌خصوص هماتیت می‌باشد، باعث تشکیل توده‌های هماتیت و اتصال این توده‌ها به ذرات حامل شده و به همراه آن به کنسانتره منتقل شده است. بنابراین اگرچه حامل کلسیت سبب شناور شدن کوارتز شده اما حضور توده‌های هماتیت منجر به تضعیف عملکرد حامل شده است.

۳-۳- بررسی اثر پارامترها در سلول فلوتاسیون مکانیکی

با توجه به نتایج آزمایش‌های میکرو فلوتاسیون، آزمایش‌ها در سلول مکانیکی آزمایشگاهی و با پالپ ۲۰٪ جامد انجام شد. در این آزمایش‌ها تأثیر مقدار حامل، دانه‌بندی ذرات حامل و تأثیر متقابل این دو متغیر بر عیار کوارتز در باطله فلوتاسیون بررسی شد. مقدار حامل بین ۲۰ تا ۷۰ درصد کوارتز موجود در نمونه اولیه در نظر گرفته شد. سایر شرایط فلوتاسیون از جمله دانه‌بندی ذرات حامل (سه محدوده دانه بندی) مطابق آزمایش‌های قبلی بوده است. نتایج این آزمایش‌ها شامل تغییرات عیار و بازیابی کوارتز در باطله در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، افزایش وزن حامل در عیار باطله تأثیرات متفاوتی دارد (شکل ۵). مقادیر کم و مقادیر خیلی زیاد حامل، افزایش عیار کوارتز در باطله را به‌همراه دارد. در این ارتباط می‌توان در نظر گرفت که افزایش بیش از حد مقدار ذرات حامل در پالپ افزایش جذب ذرات سایر کانی‌های

در شکل ۳ تصویر گرفته شده از بینوکولار نشان داده شده است که کنسانتره (شکل الف) دارای توده‌های سفید رنگ شامل حامل کلسیت و کوارتز است و در کنسانتره اثری از ذرات هماتیت نقره‌ای رنگ نیست این درحالی‌ست که تصویر گرفته شده از باطله (شکل ب) شامل توده ذرات نیست و ذرات هماتیت نقره‌ای رنگ به‌صورت پراکنده در تصویر مشاهده می‌شود.

بررسی اثر مواد شیمیایی

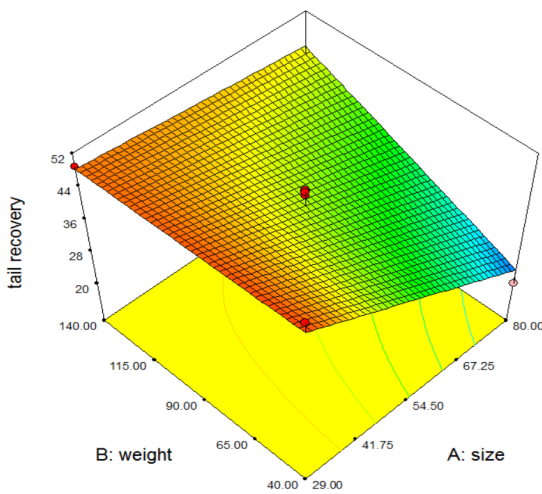
در ادامه به‌منظور بررسی اثر بازداشت‌کننده‌ها و پراکنده‌سازها در جدایش ذرات ریز کوارتز و هماتیت از یکدیگر در فرآیند فلوتاسیون حامل از سیلیکات سدیم در پراکنده‌سازی ذرات [۱۳] و نشاسته برای بازداشت هماتیت [۱۴] به‌طور جداگانه و همزمان استفاده شد. شرایط انجام فلوتاسیون شامل استفاده از دودسیل آمین به‌عنوان کلکتور، نشاسته و سدیم‌سیلیکات به‌صورت محلول هر یک به مقدار ۱ (kg/t) بوده است. تمامی آزمایش‌ها در $pH=11.5$ و حامل کلسیت با دانه‌بندی (۱۰۶-۷۵+) به مقدار ۲۵ درصد خوراک ورودی انجام شد. شرایط آزمایش‌های فلوتاسیون در جدول ۶ ذکر شده است.

جدول ۶- شرایط عملیاتی آزمایش برای بررسی اثر مواد شیمیایی

آزمایش	بازداشت کننده	متفرق کننده	بازیابی کوارتز در باطله (%)	عیار کوارتز در باطله (%)
۱	-	-	۱۸	۱۴
۲	-	سدیم سیلیکات	۷۲	۷۳
۳	نشاسته	-	۶۰	۵۸
۴	نشاسته	سدیم سیلیکات	۶۰	۵۳

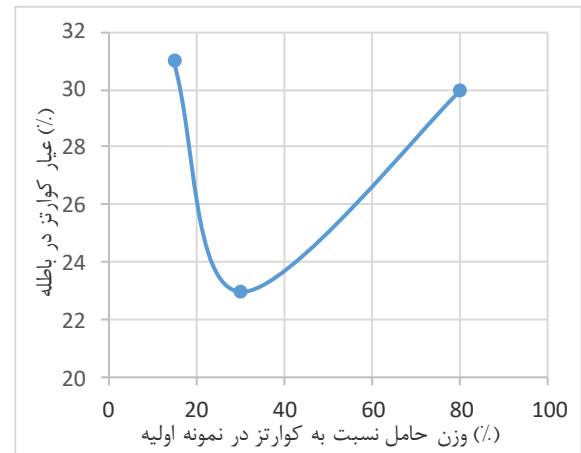
با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که حضور مواد شیمیایی از جمله سدیم سیلیکات و نشاسته در فلوتاسیون حامل برای شناورسازی ذرات کوارتز اثر منفی داشته و علاوه بر هماتیت، ذرات کوارتز نیز بازداشت شده‌اند. نتایج موجود در جدول ۶ نشان می‌دهد ذرات حامل کلسیت به تنهایی در حضور کلکتور ذکر شده کمک قابل توجهی به جدایش ذرات ریز کوارتز می‌کنند. در آزمایش شماره ۱، باطله حاصل از انجام آزمایش حاوی حداقل مقدار کوارتز است.

باطله کاهش پیدا می‌کند. کمترین مقدار وزنی کوارتز در باطله در شرایط استفاده از حامل در محدوده دانه بندی (۱۰۶-۷۵+) میکرون و مقدار وزنی ۴۰ گرم (۳۴ درصد) حاصل می‌شود. تلفیق نتایج در دو شکل ۶ و ۷ مؤید آنست که افزایش بیش از حد مقدار ذرات حامل می‌تواند اثر نامطلوبی بر عیار و بازیابی ذرات کوارتز در باطله داشته باشد از یک طرف مانع جذب ذرات ریز کوارتز و شناورسازی آن‌ها و در نتیجه افزایش مقدار کوارتز در باطله می‌شود و از طرف دیگر میزان انتخابی بودن در جذب ذرات ریز نیز کاهش می‌یابد و عیار کوارتز در باطله افزایش نشان می‌دهد.



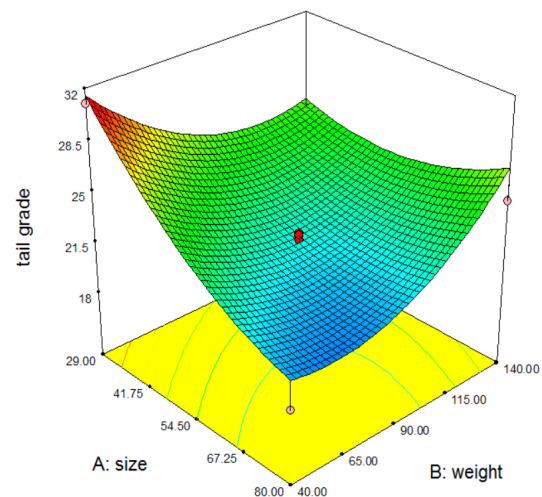
شکل ۷- اثر متقابل سایز و وزن حامل بر بازیابی کوارتز در باطله برای بررسی و مقایسه میزان تمایل جذب کوارتز و هماتیت ریز دانه به ذرات حامل کلسیت، نظریه DLVO^۱ استفاده شد. براساس این نظریه جذب ذرات ریز بر روی ذرات حامل توسط انرژی متقابل بین این دو ذره و بطور کلی تحت مکانیسم و برآیند دو نیروی دافعه ناشی از برهم کنش دو لایه الکتریکی ذرات و نیروهای جاذبه واندروالسی بین دو ذره کنترل می‌شود. انرژی متقابل بین دو ذره در یک واسطه آبی توسط این نظریه که امکان پیش بینی مقدار کمی این انرژی را فراهم می‌کند، بیان می‌شود. برای محاسبه مقدار انرژی متقابل شامل نیروهای دافعه و جاذبه در شرایط ثابت بودن پتانسیل سطحی از روابط ۱، ۲ و ۳ استفاده می‌شود [۱۵ و ۱۶].

موجود را به‌دنبال دارد و به نوعی مانع از دسترسی و جذب ذرات ریز کوارتز روی این ذرات حامل می‌شود. بنابراین باید مقدار بهینه‌ای از حامل استفاده شود.



شکل ۵- نمودار اثر مقدار حامل نسبت به عیار کوارتز در باطله

اثر متقابل اندازه و وزن حامل بر عیار کوارتز در باطله در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود افزایش سایز و کاهش مقدار حامل کلسیت سبب کاهش عیار کوارتز در باطله می‌شود. حداقل عیار کوارتز در باطله فلوتاسیون در شرایط استفاده از حامل در محدوده دانه‌بندی (۱۰۶-۷۵+) میکرون و مقدار وزنی ۴۰ گرم (۳۴ درصد نسبت به کوارتز موجود در نمونه) حاصل می‌شود.



شکل ۶- اثر متقابل سایز و وزن حامل بر عیار کوارتز در باطله

در شکل ۷ نتایج بررسی اثر متقابل سایز و وزن حامل بر بازیابی کوارتز در باطله آورده شده است. براساس این نتایج با افزایش سایز و کاهش مقدار ذرات حامل، بازیابی کوارتز در

-محاسبه کل انرژی متقابل توسط نظریه DLVO

$$V_{TD} = V_E + V_W \quad (1)$$

-محاسبه نیروی دافعه

$$V_E = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r a_1 a_2 (\varphi_{d1}^2 + \varphi_{d2}^2)}{a_1 + a_2} \times \quad (2)$$

$$\left\{ \frac{2\varphi_{d1}^2 \varphi_{d2}^2}{(\varphi_{d1}^2 + \varphi_{d2}^2)} \times \ln \left[\frac{1 + \exp(-kH)}{1 - \exp(-kH)} \right] + \ln(1 - \exp(-2kH)) \right\}$$

-محاسبه نیروی جاذبه

$$V_W = -\frac{A}{12} \times \quad (3)$$

$$\left[\frac{y}{x^2 + xy + x} + \frac{y}{x^2 + xy + x + y} + 2 \ln \left(\frac{x^2 + xy + x}{x^2 + xy + x + y} \right) \right]$$

$$x = \frac{H}{a_1 + a_2} \quad \& \quad y = \frac{a_1}{a_2}$$

متغیرهای مورد استفاده در این روابط عبارتند از:

- V_{TD} ، کل انرژی متقابل (ژول)
- V_E ، انرژی متقابل دافعه دو لایه الکتریکی (ژول)
- V_W ، انرژی متقابل جاذبه واندروالسی (ژول)
- φ_{d1} ، φ_{d2} ، پتانسیل زتا روی سطح دو ذره (ولت)
- a_1 ، a_2 ، شعاع ذرات (متر)
- ϵ_r ، ثابت قابلیت نفوذ در خلا برابر با $10^{-12} \times 8.854$ ($C^2/J.m$)
- ϵ_0 ، ثابت نسبی قابلیت نفوذ در محیط پیوسته برابر با 78.5
- H ، فاصله بین لایه استرن دو ذره (متر)
- κ ، عدد دبای ($1/m$)
- A ، ثابت هم‌ماکر برای دو سیستم کلسیت/کوارتز/آب و کلسیت/هماتیت/آب که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود

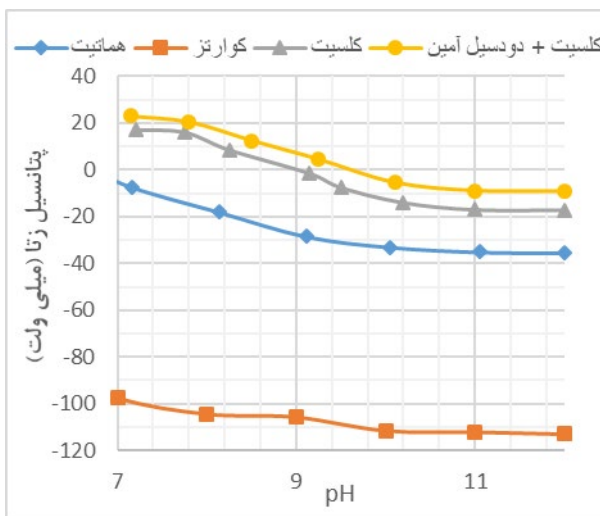
$$A_{132} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}) \quad (4)$$

$$A_{134} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{44}} - \sqrt{A_{33}})$$

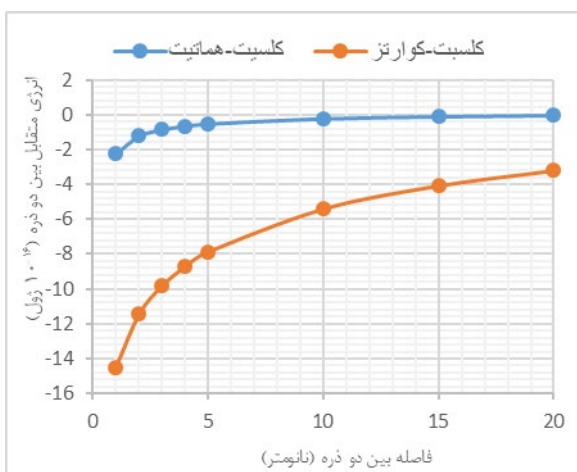
- A_{11} ، ثابت هم‌ماکر کلسیت برابر با $10^{-20} \times 10/1$ (ژول)
- A_{33} ، ثابت هم‌ماکر آب برابر با $10^{-20} \times 3/7$ (ژول)
- A_{22} ، ثابت هم‌ماکر کوارتز برابر با $10^{-20} \times 8/8$ (ژول)

تغییرات پتانسیل زتا ذرات هماتیت و کوارتز خالص و کلسیت آبران شده در حضور دودسیل آمین نسبت به pH در محدوده ۷-۱۳ به شرح شکل ۸ است [۱۵-۱۷].

با در نظر گرفتن پتانسیل زتا این سه ذره در pH=۱۱/۵ و دانه بندی ذرات کلسیت ۱۰۶-۷۵، هماتیت و کوارتز ۳۸- میکرون با استفاده از روابط ۱ تا ۴ مجموع نیروهای دافعه و جاذبه بین دو ذرات محاسبه شد. نتایج حاصل از محاسبات در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸- پتانسیل زتا ذرات نسبت به pH



شکل ۹- منحنی نیروی دافعه و جاذبه ذرات کلسیت/کوارتز و کلسیت/هماتیت

براساس شکل ۹، می‌توان ذرات کلسیت را به‌عنوان حامل ذرات ریز کوارتز در نظر گرفت. زیرا که منحنی کلسیت/کوارتز

- 1 Somasundaran, P., and Runkana, V., 2000, "Selective flocculation of fines", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 10, pp. 8-11
- 2 Sivamohan, R., 1990, "The problem of recovering very fine particles in mineral processing—a review", International Journal of Mineral Processing, 28, (3-4), pp. 247-288
- ۳ رضایی، بهرام، ۱۳۵۷، فلوتاسیون، انتشارات جهاد دانشگاهی، صفحه ۲۸۴
- 4 Subrahmanyam, T., and Forssberg, K.E., 1990, "Fine particles processing: shear-flocculation and carrier flotation—a review", International Journal of Mineral Processing, 30, (۳-۴), pp. 265-286
- 5 Raju, G.B., Subrahmanyam, T., Sun, Z., and Forsling, W., 1991, "Shear-flocculation of quartz", International journal of mineral processing, 32, (3-4), pp. 283-294
- 6 Fuerstenau, D., Li, C., and Hanson, J., 1988, "Shear flocculation and carrier flotation of fine hematite - Production and Processing of Fine Particles", Elsevier, pp. 329-335
- 7 Abdel-Khalek, N., Hassan, F., and Arafa, M., 1998, "Carrier flotation of ultrafine egyptian kaolin", Central Metallurgical Research and Development Institute CMRDI, Cairo, Egypt. Fizykochemiczne Problemy Metalurgii, 32, pp. 265-273
- 8 Cristoveanu, I., and Meech, J., 1985, "Carrier flotation of hematite", Can. Min. Metall. Bull., 78, (883), pp. 35-42
- 9 Li, D., Yin, W., Liu, Q., Cao, S., Sun, Q., Zhao, C., and Yao, J., 2017, "Interactions between fine and coarse hematite particles in aqueous suspension and their implications for flotation", Minerals Engineering, 114, pp. 74-81
- 10 Zhang, X., Hu, Y., Sun, W., and Xu, L., 2017, "The effect of polystyrene on the carrier flotation of fine smithsonite", Minerals, 7, (4), pp. 52
- 11 Altun, N., Güler, T., and Akdemir, Ü., 2010, "Pyrite flotation—a review", in Editor (Ed.) (Eds.): 'Book Pyrite flotation—a review', pp. 295-303
- 12 Somasundaran, P., and Agar, G., 1967, "The zero point of charge of calcite", Journal of Colloid and Interface Science, 24, (4), pp. 433-440

در قسمت منفی و جذب نمودار قرار دارد و بدین معناست که ذرات کوارتز در تماس با ذرات کلسیت آبران شده توسط کلکتور در $pH = ۱۱/۵$ ، جذب این ذرات می‌شوند در حالی که منحنی کلسیت/هماتیت بغیر از فواصل خیلی نزدیک (کمتر از ۱۰ نانومتر) روی مقدار صفر قرار دارد که مشخص می‌کند بین ذرات کلسیت و هماتیت نیروی جاذبه یا دافعه برقرار نیست. در همین ارتباط مشخص می‌شود که اگر به‌دلایلی ذرات هماتیت خیلی نزدیک به ذرات کلسیت قرار گیرند نیروهای جاذبه و اندروالسی غلبه کرده و جذب اتفاق می‌افتد. افزایش غلظت کلسیت در پالپ (شکل ۶ و ۷) یکی از این دلایل است که به‌علت تراکم این ذرات و محدودیت حجم ذرات هماتیت جذب کلسیت شده و سبب کاهش عیار کوارتز در کنسانتره می‌شوند.

۴- نتیجه گیری

در مقایسه کاربرد دو ذره کلسیت و پیریت به‌عنوان ذره حامل در جذب و شناورسازی ذرات ریز کوارتز (۳۸- میکرون) و جداسازی آن‌ها از ذرات ریز هماتیت از یک مخلوط به نسبت ۴۰:۶۰، طبق نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که عملکرد ذرات کلسیت به‌عنوان حامل نسبت به پیریت موفقیت آمیزتر است.

افزایش دانه‌بندی ذرات کلسیت (۱۰۶- ۷۵+ میکرون) و آماده‌سازی این ذرات با دودسیل آمین، قبل از اضافه کردن به سلول، قابلیت این ذرات در جذب ذرات ریز کوارتز را افزایش می‌داد اما استفاده از مقدار بیش از حد این ذرات، سبب کاهش این قابلیت شد.

استفاده از مواد شیمیایی نشاسته به‌عنوان بازداشت‌کننده ذرات هماتیت و سیلیکات سدیم به‌عنوان پراکنده‌ساز تأثیر نامطلوب بر جداسازی ذرات کوارتز داشت.

در شرایط بهینه شامل استفاده از کلکتور کاتیونی دودسیل آمین با غلظت $۱/۵ \text{ kg/t}$ ، $pH = ۱۱/۵$ و مقدار حامل به مقدار ۳۴ درصد کوارتز موجود در نمونه اولیه کنسانتره‌ایی با بازیابی ۷۱ درصد کوارتز و عیار ۸۱ درصد به‌دست آمد.

منابع

- 15 Feng, B., Lu, Y., and Luo, X., 2015, "*The effect of quartz on the flotation of pyrite depressed by serpentine*", Journal of Materials Research and Technology, 4, (1), pp. 8-13
- 16 Yao, J., Yin, W., and Gong, E., 2016, "*Depressing effect of fine hydrophilic particles on magnesite reverse flotation*", International Journal of Mineral Processing, 149, pp. 84-93
- 17 Deng J., Yang S., Liu C., Li H., 2019, "*Effects of the calcite on quartz flotation using the reagent scheme of starch/ dodecylamine*", Colloid and Surfaces A, 583, 123983
- 13 Rahimi, S., Irannajad, M., and Mehdilo, A., 2017, "*Effects of sodium carbonate and calcium chloride on calcite depression in cationic flotation of pyrolusite*", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 27, (8), pp. 1831-1840
- 14 Sadowska, M., Adamczyk, Z., and Nattich-Rak, M., 2017, "*Formation of hematite nanoparticle monolayers of controlled coverage and structure at polymeric microparticles*", Journal of colloid and interface science, 505, pp. 509-518